

# 心肺耐力评估方法及应用研究进展

滕宝梅<sup>1\*</sup>, 郭媛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东大学第一临床学院全科医学科, 山东 济南

<sup>2</sup>山东大学齐鲁医院全科医学科, 山东 济南

收稿日期: 2023年2月13日; 录用日期: 2023年3月9日; 发布日期: 2023年3月16日

## 摘要

美国心脏协会2016年发表的科学声明指出: 建议将心肺耐力作为一项新的临床生命体征。大量证据表明, 心肺耐力水平与心血管疾病的发病率、全因死亡率及预后相关。心肺运动测试已经被广泛认为是评估心肺耐力的金标准, 已经在心血管疾病、呼吸系统疾病、内分泌代谢疾病、心肺康复领域得到广泛应用。然而, 心肺运动测试在国内发展起步晚, 基层推广目前难以实现。若能探索合理有效、简易经济的心肺耐力评估的替代方案将会带来巨大的经济价值, 对国民健康做出更大的贡献。本篇综述主要总结心肺运动测试的临床应用和心肺耐力的徒手测试方法并进行评价。

## 关键词

心肺耐力, 心肺运动测试, 方法, 应用

# Research Progress of Cardiopulmonary Endurance Assessment Methods and Applications

Baomei Teng<sup>1\*</sup>, Yuan Guo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Department of General Practice, The First Clinical College, Shandong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Department of Department of General Practice, Qilu Hospital, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Feb. 13<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 9<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 16<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The American Heart Association's scientific statement in 2016 recommended cardiopulmonary

\*通讯作者。

fitness as a new clinical vital sign. A large amount of evidence has shown that the level of cardiopulmonary fitness is related to the incidence of cardiovascular disease, all-cause mortality, and prognosis. Cardiopulmonary exercise testing has been widely considered the gold standard for assessing cardiopulmonary endurance and has been widely used in the fields of cardiovascular diseases, respiratory diseases, endocrine and metabolic diseases, and cardiopulmonary rehabilitation. However, the development of cardiopulmonary exercise testing started late in China, and it is difficult to promote it in primary hospitals. If we can explore more reasonable, effective, simple, and economical alternative methods of cardiopulmonary endurance assessment, it will bring greater economic value and make a greater contribution to national health. This review mainly summarizes and evaluates the clinical application of cardiopulmonary exercise testing and the manual test methods of cardiopulmonary endurance.

## Keywords

Cardiopulmonary Endurance, Cardiopulmonary Exercise Test, Methods, Application

Copyright © 2023 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

美国心脏协会 2016 年发表的一篇科学声明指出: 建议心肺耐力作为一项新的临床生命体征[1]。心肺耐力水平与多个系统的整体功能相关, 包括心血管系统、呼吸系统、神经系统、骨骼肌肉系统等, 可用于评估机体整体生理功能和健康状况。已有大量证据表明, 心肺耐力水平与心血管疾病的发病率、全因死亡率及预后相关[2]。心肺运动测试已经被广泛认为是评估心肺耐力的金标准[3] [4], 已经在心血管疾病、呼吸系统疾病、代谢疾病、心肺康复领域得到广泛应用。然而, 心肺运动测试所需仪器价格昂贵、操作复杂、数据解读困难, 国内发展起步晚, 基层推广目前难以实现。因此, 探索合理有效的心肺耐力评估的基层推广方案很有必要。

## 2. 心肺耐力的概述

心肺耐力是身体健康的一项重要指标, 代表了循环和呼吸系统在持续身体活动期间提供氧气的的能力, 反映了机体将大气中的氧气输送到线粒体的综合能力[1]。这一过程包括肺通气、肺弥散、心脏泵血功能、脉管系统有效运输氧气、营养物质、代谢产物的能力, 细胞对氧气和营养物质的利用水平, 以及机体的调节能力[5] [6]。

### 2.1. 心肺耐力测试的金标准——心肺运动试验

心肺运动试验(cardiopulmonary exercise test, CPET)是一种客观、定量、无创, 可整体反应心肺代谢及整体功能水平, 是目前国际上公认的评估心肺功能的“金标准” [2]。相较于传统的心肺功能的评估手段更能反应出运动状态下的心肺功能情况, 也更能识别出静息状态下所不能发现的功能受限及高危人群, 指导临床积极采取干预措施防患于未然。

### 心肺运动测试协议

1) 跑台: 以跑台为负荷方式测量最大摄氧量准确度较高, 在测试过程中能更大程度的调动上肢、下

肢、腰背部大肌群参与运动,对心血管系统、呼吸系统和代谢系统施加更大的负荷,从而使最大心率和摄氧量达到较高水平。但该运动方案缺点在于运动强度较为剧烈,一般应用于专业运动员的心肺耐力测试从而制定个性化训练方案,对于患有心肺疾病、骨科疾病、老年人群等很多心肺耐力不好的人难以完成,风险相对较大。

2) 功率自行车:相对于跑台来说,功率自行车有自身独特的优势:① 设备仪器简单,成本更低;② 运动强度相较于跑台低,更适合心肺耐力较差、基础疾病较多的中老年人,测试过程安全性更高。但也正因为功率自行车的强度较低,主要靠下肢肌群参与测试,不能最大限度的调动全身肌群参与,所以通过跑台测得的最大摄氧量值要明显高于利用功率自行车测得的值。

## 2.2. 心肺运动测试的临床应用

### 2.2.1. 疾病的早期筛查和辅助诊断

目前临床上常用的心电图、心脏彩超、肺功能检测及其他影像学检查大多都是在患者静息状态下进行检查,在疾病早期,机体尚未出现功能学改变时,不能提供疾病明确诊断的证据。国内一项针对冠心病和非冠心病人群的心肺水平测试的对比发现[7],冠心病组患者每公斤体重最大耗氧量( $VO_{2peak}$ )、无氧阈(AT)等指标水平低于非冠心病组患者,并且在测试过程中,运动中心电图变化能更敏感地反映出心肌缺血情况,针对临床反复发生心绞痛而有创检查未见明显异常者,CPET有助于发现运动中的心肌缺血及运动中心绞痛情况,为临床诊断和治疗提供线索。在慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)的应用中,CPET相较于静态肺功能,更能及早反应出劳累性呼吸困难和运动不耐受的情况[8]。目前的研究表明,CPET在评估COPD患者是否合并肺动脉高压时发挥重要作用,因为右心导管测压是一项有创操作,所以临床常用心脏彩超评估肺动脉压力,而CPET可以根据患者运动情况估测患者肺动脉高压的可能性[8],若运动功率大于85瓦,肺动脉高压可能性较低。对于不能原因的胸痛和呼吸困难患者,CPET能通过运动中的心肺反应,鉴别患者是否有心肺疾病,辅助鉴别诊断。

### 2.2.2. 疾病的严重程度及预后评估

CPET在评估疾病严重程度上可用于多种疾病。心力衰竭是各种心脏疾病发展的严重阶段,其发病率高,病死率高。20世纪80年代,Weber [9]等提出将CPET中的峰值摄氧量( $VO_{2peak}$ )用于慢性心力衰竭患者心功能分级,相较于传统的NYHA分级,能更加客观的评价出患者心力衰竭的程度。对于一些无法实现最大运动的老年人,心肺最佳点(COP, Cardiorespiratory optimal point, 即运动过程中氧气通气当量U型曲线的最低点)是一种亚最大预后指标,无论是单独使用还是与最大摄氧量联合使用,都是社区居住成人(健康或慢性疾病)全因死亡率的良好预测指标[10]。Winter [11]等研究发现,CPET结果与冠心病患者有创心血管检测结果相关性良好, $VO_{2peak}$ 、AT、峰值氧脉搏越低则冠心病患者冠状动脉病变支数越多、左心室射血分数越低,因此CPET可用于评估冠心病患者冠状动脉病变严重程度。在呼吸系统疾病中,最大摄氧量、二氧化碳产生的通气当量( $VE/VCO_2$ )和动脉血氧饱和度( $SpO_2$ ),已被证明是比静息时获得的肺功能测量值更好的预后预测指标[12]。在一项大型回顾性研究中[13],Hiraga等人评估了运动诱发的低氧血症对死亡率的影响,结果显示 $PaO_2-VO_2$ 关系( $PaO_2$ 斜率)是一个独立的预后因素, $PaO_2$ 斜率 $\leq 80$  mmHg·l<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>患者的五年存活率约为20%。

### 2.2.3. 疾病康复指导应用

在疾病康复中,CPET应用主要是提供精准化个性化运动处方以及康复治疗效果评价。国内一项队列研究表明,在CPET指导下,单次运动即可使高血压患者运动后血压水平下降,体循环血管阻力降低、自主神经功能改善[14]。一项纳入276例射血分数保留性心力衰竭(HFpEF)患者的荟萃分析显示,与对照

组相比, CPET 指导下的运动训练可明显改善心肺适应能力和生活质量[15]。对冠脉血管重建的患者, 在 CPET 评估之后[16], 以无氧阈强度作为心脏康复的运动强度, 显著小于诱发缺血的运动强度, 安全性较好, 并且按 AT 运动方案执行运动治疗更能有效地提高缺血性心脏病患者的氧代谢水平和运动耐受力, 若能推广, 将会对病人的心脏康复提供更有价值的指导并消除患者的运动顾虑, 促进身心健康。国内四川大学呼吸医院康复科进行的一项队列研究[17]表明, COPD 患者在肺康复锻炼前进行心肺运动测试, 以无氧阈时的心率和运动强度指导运动, 患者 FEV1/Pre (%)、FEV1/FVC 指标改善程度较自由运动更明显, 并且患者生活质量有很大提高。目前临床医生对患者的心肺运动康复指导大部分停留在运动方式指导, 而对运动强度则没有给予客观、量化、标准的指导, CPET 可以很好的弥补这一不足, 并且操作简单, 指标量化, 患者可以通过监测血压、心率进行康复锻炼, 从而获得更大的收益。

#### 2.2.4. 外科手术风险评估

心肺运动试验是一种有效的术前风险分层工具, CPET 变量可预测术后发病率和死亡率[18]。普外科[19]、胸外科[20]手术患者术前行心肺功能测试, 可以预测麻醉风险及术后并发症发生风险。Alessandro 和 Romualdo 的一项回归性研究表明, 峰值耗氧量是肺癌手术患者肺部并发症的独立且可靠的预测因子, VO<sub>2</sub> 峰值低于 10 ml/kg/min 患者是术后发病和死亡的高风险组[21] [22]。此外, 厌氧阈值也可以预测传统的手术并发症, 例如胰腺十二指肠切除术后患者胰腺渗漏的发生率, 在该病例系列中, 厌氧阈值低于 10.1 ml/min/kg 确定了术后胰腺泄漏高风险的组, 其精度高于胆红素水平, 体重指数(BMI)和胰管大小[23]。CPET 还可识别术前心肺能力、运动能力下降的患者, 对于心脏手术、肺部手术、腹腔手术的术前状态评估、手术病死率及死亡率、术后并发症发生率都有预测作用[18]。

### 3. 其他徒手心肺耐力评估方法及应用评价

#### 3.1. 步行试验

##### 3.1.1. 6 分钟步行试验(6-Minute Walk Test, 6MWT)

6MWT 是目前一种临床常用的运动试验, 是一种场地测试, 常用于评估老年或功能状态较差患者的运动功能。已有的研究结果报告, 6MWD 与 CPET 所测峰值摄氧量强相关, 在 HF 患者中, 相关系数范围为 0.28 至 0.81 [24], 说明六分钟步行试验距离可以作为心衰患者心肺功能评价的有效指标。但由于其仅能获得受试者 6 分钟步行距离这一指标, 难以精确反映患者最大有氧运动能力, 而且, 目前很大一部分报告的数据并没有明确支持 6MWT 的可重复性[25] [26], 并且该测试对场地要求较高, 要求患者在长约 30 m 的空旷走廊上行走, 受试者主观因素及环境因素等影响较大, 但对于受试者来说更易于接受, 对于一些心肺基础较差的老年人来说更能反应日常活动。

##### 3.1.2. 递增往返步行试验(ISWT)

递增往返步行试验(ISWT)是一种运动强度递增的步行测试, 可用于评估最大运动能力。要求患者在 10 米的跑道上来回行走。根据录音带的指引, 调整步行速度, 直到不能患者因呼吸困难而无法保持所需的速度或患者未能在允许的时间内完成往返或达到 85% HRmax ( $[210 - 0.65 \times \text{年龄}]$ )。ISWT 中步行距离的变化可用于评估患者的心肺耐力情况[27]。早在 1998 年发表在《柳叶刀》上的一项研究[28]揭示了心力衰竭患者 ISET 测试距离和平板运动试验所测最大耗氧量之间的相关性( $r = 0.84, p < 0.0001$ )。并计算了回归方程  $VO_{2\max} = (0.27 \times \text{穿梭数量}) + 7.77$  ( $r = 0.7$ )。英国一项针对冠脉旁路移植术后患者心脏康复后 ISWT 的可重复性进行了研究[29], 在一周内重复测量 3 次, 并与 CPET 所测最大耗氧量进行相关性分析, 得到三次测量相关系数无明显统计学差异, 说明在心脏康复后心肺功能评价中, ISWT 的可重复性较好。在呼吸系统疾病应用中, 一项荟萃分析显示峰值 VO<sub>2</sub> 与 ISWT 距离(ISWD)显著相关( $r = 0.81, p < 0.0001$ )。

一项针对 6MWD 和 ISWT 的荟萃分析[30]结果表明, ISWT 在慢性阻塞性肺病(COPD)患者中, 行走距离与峰值摄氧量的相关性较 6MWD 更强。ISWT  $\times$  体重(kg)与增量循环测试测得的最大运动能力(W 峰值)之间存在显著相关性( $r = 0.88, p < 0.0001$ ) [31], 是中度或重度 COPD 患者最大运动能力的良好预测因子, 也是再住院的独立预测因子[32], 并且 ISWT 对于治疗反应敏感性更好。在囊性纤维化患者中, 一项研究[33]表明在反应症状限制性运动耐量方面, ISWT 优于 6MWT, 能更有效地引发心肺反应。分析 ISWT 相较于其他测试方法有几项独特的优势: ① 测试反应: 因为 ISWT 覆盖的持续时间和距离更长, 可能涉及更多的肌肉群, 除了有氧代谢途径外, 还能达到无氧阶段, 对于心肺耐力较差的老年人群和心肺功能较好的健康、亚健康人群都能有效的评估心肺耐力水平, ISWT 测试结束及恢复阶段的心率更高, 与 CPET 测试结束时的心率相似甚至更高, 相关指标的测试结果更接近于 CPET 结果, 并且 ISWT 重复性和敏感性更好。② 测试条件: 测试所需设备简单, 12 m 长廊大部分病房可以满足。③ 测试过程简单, 患者容易学习理解、医师容易掌握。

### 3.1.3. 耐力往返步行试验(ESWT)

耐力往返步行试验 ESWT 是在 ISWT 基础上进行的一项恒定负荷运动测试, 它测量参与者维持给定的次最大运动的能力。测试者先进行 ISWT, 随后以 85% 负荷速度持续行走。在 COPD 患者的研究中, ESWT 于 ISET 所估测的最大耗氧量之间无显著差异[34], 对于心肺耐力较差的患者, ESWT 是一种运动强度较大、更易引起会吸困难、低氧血症的运动测试, 所以同等条件下, 可使用 ISWT 进行评估, 不需要额外使用 ESWT [35]。

## 3.2. 台阶试验

### 6 分钟二级台阶试验

6 分钟二级台阶试验起源于哈佛台阶试验, 台阶指数作为重要的反映心脏机能指标, 主要是用来代替功率自行车和跑台观察受试者对负荷的适应能力以及负荷运动后的恢复能力。在我国, 台阶试验主要用于学生体质健康评价中。中国国家体育总局曾招募 67 名志愿者进行心肺运动测试的最大耗氧量与 6 min 二级台阶试验推算最大摄氧量相比较, 结果显示: 6 min 二级台阶试验推算最大摄氧量小于心肺运动试验所测得的最大摄氧量; 但 6 min 二级台阶试验推算最大摄氧量与心肺运动试验测得最大摄氧量呈正相关关系( $r = 0.861, p < 0.01$ ) [36]。台阶实验操作简单, 但是它只能对心率、血压的变化做出简单的分析, 并且通过心率推算最大耗氧量在个体中的使用度有待继续研究。且台阶的高度可能对于中老年人群来说不太合适, 患有关节炎、膝盖有问题的患者也会登不上台阶, 导致无法测试。

## 4. 总结与展望

随着我国社会经济的发展, 国民生活方式的变化, 尤其是人口老龄化及城镇化进程的加速, 居民不健康生活方式日益突出, 各种慢性病发病率逐渐增高并年轻化。吸烟、饮酒、运动减少、肥胖、熬夜等慢性病危险因素对居民健康的影响越加显著, 糖尿病、高血压病、冠心病等健康问题对国民经济发展带来了巨大负担。据统计, 2014 年中国居民经常锻炼率为 33.9%,  $\geq 20$  岁人群仅为 14.7% [37], 中国湘雅医院曾做的一项大样本队列研究显示, 中国健康成年人心肺耐力水平低于同等条件下的欧美人群[38], 原因除了人种和体格差异之外, 分析原因也与我国居民锻炼率下降、肌肉骨骼力量下降有关, 因此积极推广心肺耐力测试, 指导国民健康很重要。但是我国心肺运动测试起步较晚, 专业仪器设备只分布在发达省市, 基层人口众多、医疗资源缺乏, 难以实现广泛推广, 基于国内现状, 若能积极探索出合适的心肺运动测试的替代方案, 并在基层推广, 将对国家医疗卫生事业提供更大的帮助。本篇综述所列举的心肺运动测试的其他方法中, 6MWT 是应用最早和最广泛的方法, 可以用于群体评估, 但个体化评估证据不足;

ISWT 在心血管疾病和呼吸系统疾病中应用较多, 尤其是在心血管系统、呼吸系统疾病的心肺耐力评估及心肺康复指导中价值较 6MWT 更大, 但其测试过程比 6MWT 复杂, 需要被测试者有较好的理解能力和反应能力; 其他步行试验、台阶试验、其他文中未列举的跑步试验都存在运动强度较大, 对运动能力下降的老年人群不太适合的问题。国内对于 ISWT 的研究开展较少, 未来如果能在国内推广 ISWT 测试, 评估 ISWT 中的各种指标与 CPET 指标的相关性及在各种慢性疾病和心肺康复中的应用, 用 ISWT 代替复杂的 CPET, 评估基层社区人群特别是慢性病患者的心肺耐力, 给予个体化运动指导并进行心肺康复效果评价, 将能更大地节省医疗资源, 同时对国民健康做出巨大贡献。

## 参考文献

- [1] Ross, R., Blair, S.-N., Arena, R., *et al.* (2016) Importance of Assessing Cardiorespiratory Fitness in Clinical Practice: A Case for Fitness as a Clinical Vital Sign: A Scientific Statement from the American Heart Association. *Circulation*, **134**, e653-e699. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000461>
- [2] Arena, R., Canada, J.-M., Popovic, D., *et al.* (2020) Cardiopulmonary Exercise Testing—Refining the Clinical Perspective by Combining Assessments. *Expert Review of Cardiovascular Therapy*, **18**, 563-576. <https://doi.org/10.1080/14779072.2020.1806057>
- [3] Guazzi, M., Adams, V., Conraads, V., *et al.* (2012) EACPR/AHA Joint Scientific Statement. Clinical Recommendations for Cardiopulmonary Exercise Testing Data Assessment in Specific Patient Populations. *European Heart Journal*, **33**, 2917-2927. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehs221>
- [4] Guazzi, M., Arena, R., Halle, M., *et al.* (2018) 2016 Focused Update: Clinical Recommendations for Cardiopulmonary Exercise Testing Data Assessment in Specific Patient Populations. *European Heart Journal*, **39**, 1144-1161. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehw180>
- [5] Smarz, K., Jaxa-Chamiec, T., Chwyczo, T., *et al.* (2019) Cardiopulmonary Exercise Testing in Adult Cardiology: Expert Opinion of the Working Group of Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology of the Polish Cardiac Society. *Kardiologia Polska*, **77**, 730-756. <https://doi.org/10.33963/KP.14889>
- [6] Puente-Maestu, L. (2020) Physiological Rationale of Commonly Used Clinical Exercise Tests. *Pulmonology*, **26**, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2019.10.004>
- [7] 吴雪娇, 洪怡, 郭小亚, 等. 不同治疗方式冠心病患者心肺运动试验指标的特点分析[J]. 实用心脑血管病杂志, 2021, 29(9): 18-22.
- [8] Boutou, A.-K., Zafeiridis, A., Pitsiou, G., *et al.* (2020) Cardiopulmonary Exercise Testing in Chronic Obstructive Pulmonary Disease: An Update on Its Clinical Value and Applications. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, **40**, 197-206. <https://doi.org/10.1111/cpf.12627>
- [9] Weber, K.-T., Janicki, J.-S. and McElroy, P.-A. (1987) Determination of Aerobic Capacity and the Severity of Chronic Cardiac and Circulatory Failure. *Circulation*, **76**, I40-I45.
- [10] Laukkanen, J.-A., Kunutsor, S.-K., Araujo, C.-G., *et al.* (2021) Cardiorespiratory Optimal Point during Exercise Testing Is Related to Cardiovascular and All-Cause Mortality. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **31**, 1949-1961. <https://doi.org/10.1111/sms.14012>
- [11] Wadey, C.-A., Weston, M.-E., Dorobantu, D.-M., *et al.* (2022) The Role of Cardiopulmonary Exercise Testing in Predicting Mortality and Morbidity in People with Congenital Heart Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Journal of Preventive Cardiology*, **29**, 513-533. <https://doi.org/10.1093/eurjpc/zwab125>
- [12] Ferrazza, A.-M., Martolini, D., Valli, G., *et al.* (2009) Cardiopulmonary Exercise Testing in the Functional and Prognostic Evaluation of Patients with Pulmonary Diseases. *Respiration*, **77**, 3-17. <https://doi.org/10.1159/000186694>
- [13] Hiraga, T., Maekura, R., Okuda, Y., *et al.* (2003) Prognostic Predictors for Survival in Patients with COPD Using Cardiopulmonary Exercise Testing. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, **23**, 324-331. <https://doi.org/10.1046/j.1475-0961.2003.00514.x>
- [14] 周方, 赵志刚, 潘化平, 等. 单次运动对轻度高血压患者血压、自主神经功能和氧化应激的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2015, 30(9): 894-897.
- [15] Pandey, A., Parashar, A., Kumbhani, D., *et al.* (2015) Exercise Training in Patients with Heart Failure and Preserved Ejection Fraction: Meta-Analysis of Randomized Control Trials. *Circulation: Heart Failure*, **8**, 33-40. <https://doi.org/10.1161/CIRCHEARTFAILURE.114.001615>
- [16] 车琳, 龚朱, 蒋金法, 等. 无氧阈强度运动治疗对慢性缺血性心脏病患者运动耐力的影响[J]. 中华医学杂志, 2011, 91(24): 1659-1662.

- [17] 龚巧鹭, 雷倩, 曾佳, 等. 心肺康复运动训练对老年 COPD 康复期患者肺功能和心率变异性的影响[J]. 老年医学与保健, 2021, 27(3): 555-558.
- [18] Older, P.-O. and Levett, D.Z.H. (2017) Cardiopulmonary Exercise Testing and Surgery. *Annals of the American Thoracic Society*, **14**, S74-S83. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201610-780FR>
- [19] Moran, J., Wilson, F., Guinan, E., et al. (2016) Role of Cardiopulmonary Exercise Testing as a Risk-Assessment Method in Patients Undergoing Intra-Abdominal Surgery: A Systematic Review. *British Journal of Anaesthesia*, **116**, 177-191. <https://doi.org/10.1093/bja/aev454>
- [20] Torchio, R., Mazzucco, A., Guglielmo, M., et al. (2017) Minute Ventilation to Carbon Dioxide Output (V'E/V'CO<sub>2</sub> Slope) Is the Strongest Death Predictor before Larger Lung Resections. *Monaldi Archives for Chest Disease*, **87**, 817. <https://doi.org/10.4081/monaldi.2017.817>
- [21] Brunelli, A., Belardinelli, R., Refai, M., et al. (2009) Peak Oxygen Consumption during Cardiopulmonary Exercise Test Improves Risk Stratification in Candidates to Major Lung Resection. *Chest*, **135**, 1260-1267. <https://doi.org/10.1378/chest.08-2059>
- [22] Benzo, R., Kelley, G.-A., Recchi, L., et al. (2007) Complications of Lung Resection and Exercise Capacity: A Meta-Analysis. *Respiratory Medicine*, **101**, 1790-1797. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2007.02.012>
- [23] Ausania, F., Snowden, C.-P., Prentis, J.-M., et al. (2012) Effects of Low Cardiopulmonary Reserve on Pancreatic Leak Following Pancreaticoduodenectomy. *British Journal of Surgery*, **99**, 1290-1294. <https://doi.org/10.1002/bjs.8859>
- [24] Giannitsi, S., Bougiakli, M., Bechlioulis, A., et al. (2019) 6-Minute Walking Test: A Useful Tool in the Management of Heart Failure Patients. *Therapeutic Advances in Cardiovascular Disease*, **13**, 1-10. <https://doi.org/10.1177/1753944719870084>
- [25] Eiser, N., Willsher, D. and Dore, C.-J. (2003) Reliability, Repeatability and Sensitivity to Change of Externally and Self-Paced Walking Tests in COPD Patients. *Respiratory Medicine*, **97**, 407-414. <https://doi.org/10.1053/rmed.2002.1462>
- [26] Vagaggini, B., Taccola, M., Severino, S., et al. (2003) Shuttle Walking Test and 6-Minute Walking Test Induce a Similar Cardiorespiratory Performance in Patients Recovering from an Acute Exacerbation of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Respiration*, **70**, 579-584. <https://doi.org/10.1159/000075202>
- [27] Hanson, L.-C., McBurney, H. and Taylor, N.-F. (2018) Is the 10 m Incremental Shuttle Walk Test a Useful Test of Exercise Capacity for Patients Referred to Cardiac Rehabilitation? *European Journal of Cardiovascular Nursing*, **17**, 159-169. <https://doi.org/10.1177/1474515117721129>
- [28] Keell, S.-D., Chambers, J.-S., Francis, D.-P., et al. (1998) Shuttle-Walk Test to Assess Chronic Heart Failure. *The Lancet*, **352**, 705. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)60821-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)60821-5)
- [29] Fowler, S.-J., Singh, S.-J. and Revill, S. (2005) Reproducibility and Validity of the Incremental Shuttle Walking Test in Patients Following Coronary Artery Bypass Surgery. *Physiotherapy*, **91**, 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2004.08.009>
- [30] Chae, G., Ko, E.-J., Lee, S.-W., et al. (2022) Stronger Correlation of Peak Oxygen Uptake with Distance of Incremental Shuttle Walk Test than 6-min Walk Test in Patients with COPD: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Pulmonary Medicine*, **22**, 102. <https://doi.org/10.1186/s12890-022-01897-0>
- [31] Arnardottir, R.-H., Emtner, M., Hedenstrom, H., et al. (2006) Peak Exercise Capacity Estimated from Incremental Shuttle Walking Test in Patients with COPD: A Methodological Study. *Respiratory Research*, **7**, 127. <https://doi.org/10.1186/1465-9921-7-127>
- [32] Emtner, M.-I., Arnardottir, H.-R., Hallin, R., et al. (2007) Walking Distance Is a Predictor of Exacerbations in Patients with Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Respiratory Medicine*, **101**, 1037-1040. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2006.09.020>
- [33] Saglam, M., Vardar-Yagli, N., Savci, S., et al. (2016) Six Minute Walk Test versus Incremental Shuttle Walk Test in Cystic Fibrosis. *Pediatrics International*, **58**, 887-893. <https://doi.org/10.1111/ped.12919>
- [34] Sandland, C.-J., Morgan, M.D.L. and Singh, S.-J. (2008) Detecting Oxygen Desaturation in Patients with COPD: Incremental versus Endurance Shuttle Walking. *Respiratory Medicine*, **102**, 1148-1152. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2008.03.007>
- [35] Revill, S.-M., Morgan, M.D.L., Singh, S.-J., et al. (1999) The Endurance Shuttle Walk: A New Field Test for the Assessment of Endurance Capacity in Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Thorax*, **54**, 213-222. <https://doi.org/10.1136/thx.54.3.213>
- [36] 范超群, 徐凯, 聂明剑, 等. 心肺耐力的科学测评: 心肺运动试验与 6 min 二级台阶试验的比较[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(23): 3686-3691.
- [37] 中国心血管健康与疾病报告 2020 概要[J]. 中国循环杂志, 2021, 36(6): 521-545.

- 
- [38] Dun, Y.-S., Olson, T.-P., Li, C., *et al.* (2021) Characteristics and Reference Values for Cardiopulmonary Exercise Testing in the Adult Chinese Population—The Xiangya Hospital Exercise Testing Project (the X-ET Project). *International Journal of Cardiology*, **332**, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2021.03.013>