

doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.03.030

View this article at: <http://dx.doi.org/10.3978/j.issn.2095-6959.2018.03.030>

## 心肺运动试验在脑卒中患者心肺功能评估中的研究进展

钱贞<sup>1,2</sup> 综述 陈伟<sup>3</sup> 审校

(1. 常州德安医院康复科, 江苏 常州 213000; 2. 徐州医科大学医学技术学院, 江苏 徐州 221000  
3. 徐州市中心医院康复科, 江苏 徐州 221000)

**[摘要]** 心肺运动试验(cardiopulmonary exercise testing, CPET)实时监测身体运动应激时O<sub>2</sub>吸入量和CO<sub>2</sub>呼出量, 运用计算机及踏车(平板)技术, 从而实现对人体综合、系统地评估。CPET在心血管疾病与呼吸系统疾病等领域中被广泛运用, 却罕见于脑卒中领域, 但脑卒中患者心肺功能障碍真实存在, 并会带来一系列危害, 对其心肺功能进行评估有一定的必要性。在相关文献中并未发现脑卒中患者进行CPET时出现严重不良事件, 对于有平衡问题的脑卒中患者, 在测试时建议使用带有靠背的自行车或减重跑步机, 对于中重度功能障碍的患者, 建议使用半卧位、平卧位自行车或整个身体靠坐的踏阶设备(total-body recumbent stepper, TBRS)。测试时判定脑卒中患者是否达到最大努力的标准中, 呼吸交换率(respiratory exchange ratio, RER)>1.0似乎是一个合理的标准, 现存研究结果普遍提示脑卒中患者心肺适能(VO<sub>2peak</sub>)降低, 所以应对其心肺功能积极评估与干预。本文综述在卒中患者中开展CPET的相关研究进展, 以期为临床推广卒中患者的CPET提供参考依据。

**[关键词]** 脑卒中; 心肺运动试验; 心肺功能; 最大摄氧量; 峰值摄氧量

## Research progress of cardiopulmonary exercise testing in cardiopulmonary function assessment of patients with stroke

QIAN Zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>3</sup>

(1. Department of Rehabilitation, Changzhou De'an Hospital, Changzhou Jiangsu 213000; 2. College of Medical Technology, Xuzhou Medical University, Xuzhou Jiangsu 221000; 3. Department of Rehabilitation, Xuzhou Central Hospital, Xuzhou Jiangsu 221000, China)

**Abstract** Cardiopulmonary exercise testing (CPET) can monitor O<sub>2</sub> inhalation and CO<sub>2</sub> exhalation in real time during physical exercise stress, and can make use of computer and treadmill (plate) technology, so as to achieve a comprehensive and systematic assessment of the human body. CPET is widely used in the fields of cardiovascular and respiratory diseases, but it is rare in the field of stroke. But the cardiopulmonary dysfunction of stroke patients exists, and will bring a series of damages, so the cardiopulmonary function evaluation is necessary. In the related literatures, no serious adverse events were found in stroke patients during CPET. For stroke patients with balance problems, a bicycle with a backrest or a treadmill with weight support is recommended during the test. For patients

收稿日期 (Date of reception): 2017-12-20

通信作者 (Corresponding author): 陈伟, Email: 846037462@qq.com

with moderate and severe dysfunction, it is recommended to use a semi decubitus position, a supine bicycle, or a total-body recumbent stepper (TBRS). Respiratory exchange ratio (RER) >1.0 seems to be a reasonable standard in determining whether stroke patients reach their maximum effort. The results of existing researches generally suggested cardiopulmonary fitness ( $VO_{2peak}$ ) reduced in stroke patients, therefore, the cardiopulmonary function of stroke patients should be actively evaluated and intervened. This article reviews the related research progress in the development of CPET in stroke patients, in order to provide reference for the clinical promotion of CPET for stroke patients.

**Keywords** stroke; cardiopulmonary exercise testing; cardiopulmonary function; maximal oxygen uptake; peak oxygen uptake

心肺运动试验 (cardiopulmonary exercise testing, CPET) 以气体交换测量值为核心指标, 同步评估心血管及呼吸系统对同一运动应激的反应情况, 是一项非侵入、精确、重复性好的定量评估检查方法<sup>[1]</sup>。CPET较一般静态检查具有一定的优势, 可监测运动状态下生理指标的动态变化, 实现人体整体功能的全面评估<sup>[2]</sup>。由于脑卒中会造成运动、平衡及协调功能障碍等问题, 并阻碍CPET在脑卒中患者中的顺利进行, 目前国内外相关报道较少, 但近年来脑卒中患者心肺功能的评估与干预逐渐引起人们的重视。

## 1 CPET 的原理

CPET的基本原理是实时监测身体运动应激时 $O_2$ 吸入量和 $CO_2$ 呼出量, 综合运用计算机及踏板(平板)技术, 实现对人体全面、整体、系统地评估<sup>[3]</sup>。CPET通常采用递增负荷运动形式, 在10 min左右的测试过程中患者需佩戴一个收集气体的面罩, 面罩由气体采样线连接至代谢分析系统, 在持续监测心电图、血压、氧饱和度的时候, 代谢分析系统同步记录气体的流速、分钟通气量、摄氧量和 $CO_2$ 呼出量等关键指标<sup>[4]</sup>。CPET是一种操作简单、价格相对低廉、无创的检查技术, 由于从中获得的信息量丰富, 可应用在呼吸困难查因、运动诱发性哮喘的诊断、慢性心力衰竭和肺动脉高压的预后预测、残疾鉴定、术前评估、运动处方的制定及心肺康复疗效评估等方面<sup>[5]</sup>。由此可见, CPET在不同的症状和疾病的评估与管理中有重要的临床价值, 适用范围较广。

## 2 CPET 在脑卒中患者中运用的必要性

CPET目前主要在心血管疾病和呼吸系统疾病患者的心肺功能及疗效评估中被广泛运用。由于脑卒中患者存在肌肉瘫痪、肌张力异常、平衡

及协调功能受损等问题, 目前在脑卒中患者中罕见使用。但有研究<sup>[6]</sup>发现: 大约有2/3的脑卒中患者存在冠心病, 且心血管疾病是导致脑卒中后死亡的主要原因。除此之外, 慢性阻塞性肺疾病在65~74岁的正常人中发生率为3.4%, 而在脑卒中患者中显著增高, 发生率为17%<sup>[7]</sup>, 心肺功能的下降会增加脑卒中患者的再入院率和病死率<sup>[8]</sup>。因此需在脑卒中患者中进行心肺运动试验, 以尽早明确其心肺功能水平, 并以此为基础设计基于运动强度的心肺干预方案, 确定干预措施的有效性。

## 3 CPET 在脑卒中患者中运用的安全性

孙兴国<sup>[9]</sup>提出: 作为人体整体功能的客观评估技术, CPET可应用于正常人及各类疾病患者。但目前国内外关于脑卒中患者进行CPET的报道较少, 涉及不良事件的报道则更为罕见。Askim等<sup>[10]</sup>研究报道: 在进行CPET时有1%的患者有 $\geq 1$ 个(最多4个)的不适症状, 同时有测试者发生跌倒, 但没有受伤。Billinger等<sup>[11]</sup>研究报道: 1位因ST段抬高超过1 mm而终止CPET的患者。徐泉等<sup>[12]</sup>做了相似的研究, 发现脑卒中患者在进行递增负荷运动测试过程中, 没有出现任何不良的心血管事件。这些研究均没有发生重大的不良事件, 但仍无法得出关于测试安全性的明确结论。因现存相关研究较少, 未来的研究仍需进一步收集CPET测试过程中不良事件方面更多的信息, 以求证测试的安全性。

## 4 CPET 在脑卒中患者中的具体运用

### 4.1 CPET 的适应证与禁忌证

适应证: 1) 临床诊断为脑出血或脑梗塞且病情稳定; 2) 具有坐站体位转变能力<sup>[13]</sup>; 3) 可独立步行10 m(借助或不借助辅助装置), 没有明显的疼痛限制<sup>[14]</sup>; 4) 简易精神状态检查量表评分

(mini-mental state examination, MMSE) $>24$ , 排除痴呆, 确保具有理解测试步骤和意义的意义<sup>[15]</sup>。禁忌证: 1) 3个月前因心肌梗死、心脏手术、充血性心力衰竭而住院治疗; 2) 有明显的心律失常、肥厚型心肌病、严重主动脉狭窄、肺栓塞等症状; 3) 不能控制的静息严重高血压、控制不好的代谢性疾病如糖尿病, 血糖水平 $<70$  mg/dL或 $>300$  mg/dL<sup>[13]</sup>; 4) 最近有胸部不适症状; 5) 正在吸烟或有明显的肺部症状; 6) 有限制运动能力的其他肌肉骨骼问题, 如肌肉拉伤、骨折等; 7) 外周血管疾病或下肢血管狭窄<sup>[16]</sup>。

## 4.2 CPET 设备选择和测试方案

设备的选择取决于测试的目标和患者的能力, 可选择的设备包括以下几种: 步行<sup>[17]</sup>、跑步机<sup>[6]</sup>、机器人辅助的跑台<sup>[18]</sup>、下肢功率车<sup>[19]</sup>、结合上下肢的测力计<sup>[20]</sup>、曲柄臂测力计<sup>[21]</sup>及整个身体靠坐的踏阶设备(total-body recumbent stepper, TBRs)<sup>[22]</sup>等。为保证测试的有效性和数据的准确性, 应指导患者在测试前3 h内勿进食、饮酒或喝咖啡等, 勿进行高强度运动, 避免其心率和血压受影响<sup>[23]</sup>。

### 4.2.1 跑步机测试方案

使用跑步机的测试方案多样, 前提是患者具有步行能力。Macko等<sup>[24]</sup>研究表明: 大多数研究采用等速分等级的跑步机方案, 进行该方案的测试者可自主选择步行速度, 步行速度增加后, 跑步机坡度每2 min增加2.5%~10%。有两项研究<sup>[8,25]</sup>使用配套的体重支持系统, 可使行走能力较差的患者安全进行CPET。而Mackay-Lyons等<sup>[26]</sup>的方案类似于Macko的方案, 坡度每2 min增加2.5%~10%, 步行速度也随之每2 min增加0.05 m/s。

### 4.2.2 功率自行车测试方案

功率自行车对有平衡问题或步态不稳的患者更具有实用性, 且与跑步机方案相比, 其噪声更少, 在心电图和血压检测时干扰更小。考虑到脑卒中患者的功能障碍, 一些研究<sup>[27-29]</sup>将普通功率车进行改良, 使用具有躯干支持功能的椅子<sup>[27]</sup>, 配备能将患者偏瘫侧脚固定在功率车脚踏上的装置<sup>[28]</sup>, 或使用半卧位的功率自行车<sup>[29]</sup>, 这些改良措施更有利于脑卒中患者完成安全有效的测试。

在涉及自行车的研究中, 大多数研究选择直立位的功率自行车, 采用变速方案, 虽然每一档使用不同的增量, 但持续的时间多为50~60 s, 蹬车的目标节奏也都在50~70 r/min之间。大多数研究使用的踏车负荷增量为10 W/min, 如Jin等<sup>[30-31]</sup>设计的功率车方案为以0 W负荷开始, 转

速为50 r/min, 每分钟增加10 W直到患者疲劳。为排除偏瘫侧下肢对测试结果的影响, Stibrant Sunnerhagen<sup>[32]</sup>的研究使用健侧腿蹬车的方案, 且负荷的增加不分等级。由于脑卒中患者有姿势控制和肢体放置功能缺陷, 半卧位自行车比直立位自行车更适合脑卒中患者, 同时也适用于早期患者, 测试方案包括负荷为10 W的2 min热身, 转速为50 r/min, 负荷增量为5 W/min<sup>[29]</sup>。

### 4.2.3 TBRs 测试方案

美国运动医学院推荐的黄金标准<sup>[33]</sup>是整个身体靠坐的TBRs, 这个设备为躯干和远端肢体提供支持, 适用于由于步行障碍、平衡、协调等问题而不能使用跑步机或是功率自行车的脑卒中患者。TBRs可使脑卒中患者更易达到极量运动, 且不需要患者有很高的运动水平, 适用于轻度到重度脑卒中的患者。

Billinger等<sup>[34]</sup>将TBRs应用于脑卒中患者的心肺功能评定中, 其方案为: 每个测试阶段维持2 min, 测试开始的阻力为25 W, 每2 min增加15 W, 测试的最大阻力为130 W, 踏阶速度为80踏/min。研究显示: 同一个患者分别使用TBRs和功率车进行2次心肺运动测试, 2次获得的峰值摄氧量( $VO_{2peak}$ )有差异, 与自行车相比 $[15.4$  mL/(kg·min<sup>-1</sup>)], 使用TBRs获得的 $VO_{2peak}$ 显著增加 $[16.6$  mL/(kg·min<sup>-1</sup>)]. 这可能是由于上下肢的联合运动增加了机体对氧气的需求。

## 5 CPET 在脑卒中患者中运用涉及的主要参数指标 ( $VO_{2max}/VO_{2peak}$ )

目前在脑卒中患者中进行CPET还没有正式的指导方针, 各个研究中涉及的参数指标不一致, 差异较大, 但最普遍的指标是最大摄氧量( $VO_{2max}$ )或峰值摄氧量( $VO_{2peak}$ ), 且关于 $VO_{2peak}$ 的报道较 $VO_{2max}$ 多。这是因为脑卒中患者普遍存在神经运动功能受损、功能性肌肉体积下降、瘫痪肌肉的氧化能力下降、共存疾病等问题, 因此要在脑卒中患者这个特殊人群中获得 $VO_{2max}$ 有一定难度。临床上通常用 $VO_{2peak}$ 来描述最高心肺功能水平。 $VO_{2peak}$ 的获得前提是需要测试者在测试过程中达到最大努力程度, 其计算可使用不同方法, 包括取测试中的最高值或是取测试最后30 s的平均值。在一个包含12例急性男性脑卒中患者的对照研究中, 其采用的是自行车方案<sup>[35]</sup>, 结果显示:  $VO_{2peak}$ 的值较低, 为8.02 mL/(kg·min<sup>-1</sup>)。在包含10名社区居住的脑卒中患者中使用跑步机方案的研究<sup>[36]</sup>中,

发现 $VO_{2peak}$ 的值较高, 为 $31.4 \text{ mL}/(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$ 。而研究<sup>[23]</sup>报道 $VO_{2peak}$ 的值为 $15\sim 25 \text{ mL}/(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$ 。上述研究结果提示 $VO_{2peak}$ 结果波动较大。在2个包括年龄和性别匹配的健康对照组的研究<sup>[35,37]</sup>中, 脑卒中患者实测的 $VO_{2peak}$ 分别是健康对照组的26%<sup>[35]</sup>和87%<sup>[37]</sup>。

## 6 CPET中用于判定达到最大努力(获取 $VO_{2max}/VO_{2peak}$ )的参数标准

$VO_{2max}$ 是一个人在递增负荷运动中摄入和使用 $O_2$ 的最大能力, 是决定一个人运动能力和心肺功能的金标准。临床上因脑卒中患者特殊的功能障碍, 常用 $VO_{2peak}$ 替代 $VO_{2max}$ 。无论是 $VO_{2max}$ 还是 $VO_{2peak}$ 都需测试者在运动过程中达到最大努力状态, 然而在CPET测试过程中达到最大努力的标准尚未明确, 没有可以提供的金标准。现存研究<sup>[22]</sup>中涉及的确最大努力状态的指标分为2类: 最佳指标和次级指标, 可用来借鉴参考。

### 6.1 最佳指标

确定达到真实 $VO_{2max}$ 的最佳指标是在测试过程中观察到尽管功率增加但 $VO_2$ 不再增加, 也就是达到平台期。但在健康人群中把平台期作为达到 $VO_{2max}$ 的可靠指标仍存在诸多争议<sup>[38]</sup>, 在脑卒中患者中平台期是否可靠也值得进一步研究。

### 6.2 次级指标

在缺乏平台反应的情况下, 一系列其他生理反应指标被用来确认是否达到最大努力。

#### 6.2.1 年龄预测最大心率百分比

将实测心率>年龄预测最大心率的90%定为次级指标<sup>[18]</sup>。对于服用 $\beta$ 受体阻滞剂的患者, 该指标调整为85%<sup>[23]</sup>。但Tang等<sup>[39]</sup>研究发现: 对于服用 $\beta$ 受体阻滞剂的测试者, 即使该指标调整为70%, 能达到这个指标的人数仍不足10%。且用最大心率来确定达到最大努力状态的方法已在40余年前就被Cumming等<sup>[40]</sup>质疑, 因此最大心率在脑卒中人群中不推荐使用。

#### 6.2.2 呼吸交换率

把呼吸交换率(respiratory exchange ratio, RER)作为判断达到最大努力状态的次级指标的研究较多, 但标准不一:  $RER>1.0$ <sup>[41]</sup>,  $RER>1.1$ <sup>[42]</sup>及 $RER>1.15$ <sup>[43]</sup>。值得注意的是, RER值与年龄相关, 因此在脑卒中患者中使用需谨慎<sup>[42]</sup>。Edvardsen等<sup>[44]</sup>研究显示: 峰值 $RER>1.0$ 表明年龄超

过65岁的人已经达到最大努力状态, 考虑到脑卒中患者往往是老年人,  $RER>1.0$ 或将是一个合理性的标准。

#### 6.2.3 血压

Mackay-Lyons等<sup>[45]</sup>研究显示: 收缩压超过200 mmHg( $1 \text{ mmHg}=0.133 \text{ kPa}$ )可作为达到最大努力状态的提示。但这个次级指标仍需要仔细商榷, 因为血压一般是监测安全性的指标, 而不是判断是否达到最大努力状态的指标。说明因安全原因而终止测试的标准和达到最大努力的标准现已交替使用。

#### 6.2.4 其他

有研究<sup>[46]</sup>提出将血乳酸 $>8 \text{ mmol/L}$ 定为次级标准。由于大多数患者使用的是症状限制性运动测试方案, CPET可能会提前终止, 所以大多数定义的标准都达不到。只有少数的研究<sup>[19,47]</sup>报告了达到预定标准的人数: 满足1个或更多预定标准的患者数量从11%<sup>[47]</sup>到100%<sup>[19]</sup>不等。

## 7 CPET 终止标准

终止运动试验的标准在不同研究中不尽相同。大多数研究提到了ACSM指南, 或全部按照指南执行, 或只使用其中的某些内容。现将脑卒中患者进行CPET的测试终止标准归纳如下(以下标准达到其中任何一条, 测试即终止): 1)测试者意志疲劳要求终止测试<sup>[14]</sup>; 2)测试者 $VO_{2peak}$ 达到平台期或尽管运动继续但其 $VO_2$ 呈下降趋势<sup>[18]</sup>; 3)在运动的最后阶段每单位时间内 $VO_2$ 的改变 $<1.5 \text{ mL}/(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$ <sup>[20]</sup>; 4)测试者步态不稳(跑步机)或不能保持规定的功率车速<sup>[3]</sup>; 5)观察到不良的心血管事件或患者对运动测试有不良反应<sup>[11]</sup>; 6)达到年龄预计最大心率<sup>[48]</sup>; 7) $RER>1.0$ <sup>[41]</sup>,  $>1.1$ <sup>[42]</sup>或 $>1.15$ <sup>[43]</sup>; 8)血压异常, 收缩压 $>210 \text{ mmHg}$ 或舒张压 $>115 \text{ mmHg}$ ; 随着负荷的增加, 测试者血压不升高, 反而下降超过 $10 \text{ mmHg}$ <sup>[45]</sup>。

## 8 结语

脑卒中指南<sup>[49]</sup>推荐脑卒中患者进行心肺适能训练, 然而这很少被实施, 因为评估脑卒中患者的心肺功能具有一定的难度, 许多临床医生在脑卒中后心肺运动测试及制定运动处方中缺乏经验。本次综述的结果不能够说明哪个测试方案是最合适的, 但可以为临床工作提供一些建议: 对于有平衡问题的脑卒中患者进行CPET, 建议使用

带有靠背的自行车或减重跑步机; 对于中重度功能障碍的患者, 建议使用半卧位、平卧位自行车或TBRS。目前关于脑卒中患者心肺功能纵向变化的报道较缺乏, 未来需要进行更多的纵向队列研究以确定 $VO_{2max}$ 是否随时间的变化, 以制定脑卒中患者心肺功能训练的最佳“处方”。

## 参考文献

- 孙兴国. 心肺运动试验在临床心血管病学中的应用价值和前景[J]. 中华心血管病杂志, 2014(4): 347-351.  
SUN Xingguo. Application value and prospect of cardiopulmonary exercise test in clinical cardiovascular disease[J]. Chinese Journal of Cardiology, 2014(4): 347-351.
- 尹希, 孙兴国, Stringer WW, 等. 代谢、血液碱化和纯氧影响呼吸调控的人体实验研究I: 运动试验[J]. 中国应用生理学杂志, 2015, 31(4): 345-348.  
YIN Xi, SUN Xingguo, Stringer WW, et al. Human experiments of metabolism, blood alkalization and oxygen effect on control and regulation of breathing I: room air exercise test[J]. Chinese Journal of Applied Physiology, 2015, 31(4): 345-348.
- Howard L, Grocott MP, Naeije R, et al. Cardiopulmonary exercise testing[J]. Pulm Med, 2012, 2012: S64134.
- Schraufnagel DE, Agostoni P. Cardiopulmonary exercise testing[J]. Ann Am Thorac Soc, 2017, 14(Supplement\_1): S1-S2.
- Huang W, Resch S, Oliveira RK, et al. Invasive cardiopulmonary exercise testing in the evaluation of unexplained dyspnea: Insights from a multidisciplinary dyspnea center[J]. Eur J Prev Cardiol, 2017, 24(11): 1190-1199.
- Yoo J, Lim KB, Lee H J, et al. Cardiovascular response during submaximal underwater treadmill exercise in stroke patients[J]. Ann Rehabil Med, 2014, 38(5): 628-636.
- Sisante JF, Mattlage AE, Arena R, et al. Decreased tidal volume may limit cardiopulmonary performance during peak exercise in subacute stroke[J]. J Cardiopulm Rehabil Prev, 2015, 35(5): 334-341.
- Mackay-Lyons M, McDonald A, Matheson J, et al. Dual effects of body-weight supported treadmill training on cardiovascular fitness and walking ability early after stroke: A randomized controlled trial[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2013, 27(7): 644-653.
- 孙兴国. 整体整合生理学医学新理论体系: 人体功能一体化自主调控[J]. 中国循环杂志, 2013(2): 88-92.  
SUN Xingguo. New global integrated physiological medicine theory system: the integrated and autonomous regulation of human function[J]. Chinese Circulation Journal, 2013(2): 88-92.
- Askim T, Dahl AE, Aamot IL. High-intensity aerobic interval training for patients 3–9 months after stroke: a feasibility study[J]. Physiother Res Int, 2014, 19(3): 129-139.
- Billinger SA, Loudon JK, Gajewski BJ. Validity of a total body recumbent stepper exercise test to assess cardiorespiratory fitness[J]. J Strength Cond Res, 2008, 22(5): 1556-1562.
- 徐泉, 潘钰, 张啸飞, 等. 脑卒中偏瘫患者心肺运动功能评估临床研究[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(12): 1334-1338.  
XU Quan, PAN Yu, ZHANG Xiaofei, et al. A clinical study on cardiopulmonary exercise testing in people with hemiplegia after stroke[J]. China Journal of Rehabilitation Medicine, 2016, 31(12): 1334-1338.
- Billinger SA, Mattlage AE, Lentz AA, et al. Moderate-high intensity exercise training improves submaximal and peak cardiorespiratory response in subacute stroke[J]. Stroke, 2013, 44: ATP314.
- Billinger SA, Mattlage AE, Lentz AA, et al. Submaximal exercise test to predict  $VO_2$  peak in subacute stroke[J]. Stroke, 2013, 44: AWP316.
- Cao L, Hai S, Lin X, et al. Comparison of the saint louis university mental status examination, the mini-mental state examination, and the Montreal cognitive assessment in detection of cognitive impairment in Chinese elderly from the geriatric department[J]. J Am Med Dir Assoc, 2012, 13(7): 626-629.
- Marzolini S, Oh P, Mcilroy W, et al. The feasibility of cardiopulmonary exercise testing for prescribing exercise to people after stroke[J]. Stroke, 2012, 43(4): 1075-1081.
- Billinger SA, Mattlage AE, Ashenden AL. Aerobic exercise in subacute stroke improves cardiovascular health and physical performance[J]. J Neurol Phys Ther, 2012, 36(4): 159-165.
- Stoller O, de Bruin ED, Schindelholz M, et al. Cardiopulmonary exercise testing early after stroke using feedback-controlled robotics-assisted treadmill exercise: test-retest reliability and repeatability[J]. J Neuroeng Rehabil, 2014, 11: 145.
- Merry KL, Glaister M, Howatson G, et al. The influence of evaluation protocol on time spent exercising at a high level of oxygen uptake during continuous cycling[J]. J Sports Med Phys Fitness, 2015, 55(10): 1091-1098.
- Hill DC, Ethans KD, MacLeod DA, et al. Exercise stress testing in subacute stroke patients using a combined upper- and lower-limb ergometer[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2005, 86(9): 1860-1866.
- Sutbeyaz ST, Koseoglu F, Inan L, et al. Respiratory muscle training improves cardiopulmonary function and exercise tolerance in subjects with subacute stroke: a randomized controlled trial[J]. Clin Rehabil, 2010, 24(3): 240-250.
- Wilson DR, Mattlage AE, Seier NM, et al. Recumbent Stepper Submaximal Test response is reliable in adults with and without stroke[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0172294.
- van de Port IG, Kwakkel G, Wittink H. Systematic review of cardiopulmonary exercise testing post stroke: are we adhering to

- practice recommendations? [J]. *J Rehabil Med*, 2015, 47(10): 881-900.
24. Macko RF, DeSouza CA, Tretter LD, et al. Treadmill aerobic exercise training reduces the energy expenditure and cardiovascular demands of hemiparetic gait in chronic stroke patients [J]. *Stroke*, 1997, 28(2): 326-330.
  25. Stoller O, de Bruin ED, Schindelholz M, et al. Evaluation of exercise capacity after severe stroke using robotics-assisted treadmill exercise: A proof-of-concept study [J]. *Technol Health Care*, 2013, 21(2): 157-166.
  26. Mackay-Lyons MJ, Makrides L. Exercise capacity early after stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2002, 83(12): 1697-1702.
  27. Yang HC, Lee CL, Lin R, et al. Effect of biofeedback cycling training on functional recovery and walking ability of lower extremity in patients with stroke [J]. *Kaohsiung J Med Sci*, 2014, 30(1): 35-42.
  28. Steen Krawczyk R, Vinther A, Caesar Petersen N, et al. "Graded cycling test with talk test" is a reliable test to monitor cardiovascular fitness in patients with minor stroke [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2017, 26(3): 494-499.
  29. Tang A, Sibley KM, Thomas SG, et al. Maximal exercise test results in subacute stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(8): 1100-1105.
  30. Jin H, Jiang Y, Wei Q, et al. Effects of aerobic cycling training on cardiovascular fitness and heart rate recovery in patients with chronic stroke [J]. *NeuroRehabilitation*, 2013, 32(2): 327-335.
  31. Probasco J, Chang T, Victor D, et al. Cardiopulmonary response to ischemic stroke varies by stroke location [J]. *Stroke*, 2013, 44: AWP428.
  32. Stibrant Sunnerhagen K. Circuit training in community-living "younger" men after stroke [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2007, 16(3): 122-129.
  33. Herda AA, Lentz AA, Matlage AE, et al. Cross-validation of the recumbent stepper submaximal exercise test to predict peak oxygen uptake in older adults [J]. *Phys Ther*, 2014, 94(5): 722-729.
  34. Billinger SA, Tseng BY, Kluding PM. Modified total-body recumbent stepper exercise test for assessing peak oxygen consumption in people with chronic stroke [J]. *Phys Ther*, 2008, 88(10): 1188-1195.
  35. Teixeira da Cunha Filho I, Lim PA, Qureshy H, et al. A comparison of regular rehabilitation and regular rehabilitation with supported treadmill ambulation training for acute stroke patients [J]. *J Rehabil Res Dev*, 2001, 38(2): 245-255.
  36. Hill TR, Gjellesvik TI, Moen PM, et al. Maximal strength training enhances strength and functional performance in chronic stroke survivors [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2012, 91(5): 393-400.
  37. Pang MY, Eng JJ, Dawson AS. Relationship between ambulatory capacity and cardiorespiratory fitness in chronic stroke: influence of stroke-specific impairments [J]. *Chest*, 2005, 127(2): 495-501.
  38. do Nascimento PC, de Lucas RD, de Souza KM, et al. The effect of prior exercise intensity on oxygen uptake kinetics during high-intensity running exercise in trained subjects [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2015, 115(1): 147-156.
  39. Tang A, Sibley KM, Thomas SG. Maximal exercise test results in subacute stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(8): 1100-1105.
  40. Cumming GR, Borysyk LM. Criteria for maximum oxygen uptake in men over 40 in a population survey [J]. *Med Sci Sports*, 1972, 4(1): 18-22.
  41. Han EY, Im SH. Effects of a 6-week aquatic treadmill exercise program on cardiorespiratory fitness and walk walking endurance in subacute stroke patients: a pilot trial [J]. *J Cardiopulm Rehabil Prev*, 2017, Epub ahead of print.
  42. Balady GJ, Arena R, Sietsema K, et al. Clinician's guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2010, 122(2): 191-225.
  43. Pang MY, Charlesworth SA, Lau RW, et al. Using aerobic exercise to improve health outcomes and quality of life in stroke: evidence-based exercise prescription recommendations [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2013, 35(1): 7-22.
  44. Edvardsen E, Hem E, Anderssen SA. End criteria for reaching maximal oxygen uptake must be strict and adjusted to sex and age: a cross-sectional study [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e85276.
  45. Mackay-Lyons MJ, Makrides L. Longitudinal changes in exercise capacity after stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2004, 85(10): 1608-1612.
  46. Guazzi M, Adams V, Conraads V, et al. EACPR/AHA scientific statement: clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations [J]. *Circulation*, 2012, 126(18): 2261-2274.
  47. Billinger SA, Arena R, Bernhardt J, et al. Physical activity and exercise recommendations for stroke survivors: a statement for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association [J]. *Stroke*, 2014, 45(8): 2532-2553.
  48. Dobrovolsky CL, Ivey FM, Rogers MA, et al. Reliability of treadmill exercise testing in older patients with chronic hemiparetic stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2003, 84(9): 1308-1312.
  49. Hacke W, Kaste M, Skyhoj Olsen T, et al. European Stroke Initiative (EUSI) recommendations for stroke management—the European Stroke Initiative Writing Committee [J]. *Eur J Neurol*, 2000, 7(6): 607-623.

**本文引用:** 钱贞, 陈伟. 心肺运动试验在脑卒中患者心肺功能评估中的研究进展 [J]. *临床与病理杂志*, 2018, 38(3): 641-646. doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.03.030

**Cite this article as:** QIAN Zhen, CHEN Wei. Research progress of cardiopulmonary exercise testing in cardiopulmonary function assessment of patients with stroke [J]. *Journal of Clinical and Pathological Research*, 2018, 38(3): 641-646. doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.03.030