

脑卒中患者心肺运动试验评估方法的研究进展

杨青青¹ 周明超² 王玉龙²

¹山东中医药大学, 济南 250355; ²深圳市第二人民医院, 深圳 518033

通信作者: 王玉龙, Email: ylwang668@163.com

【摘要】 脑卒中患者在康复过程中, 往往伴随高风险和低功能两大问题, 严重影响康复治疗进程。心肺运动试验(CPET)作为评估患者心肺功能的一种方法, 现广泛应用于心肺疾病的康复过程中。然而, CPET在脑卒中患者中的应用尚处于起步阶段, 极少部分患者在康复训练前会进行心肺功能和耐力的评估和训练。本文对 CPET 的适应症和禁忌症、主要评估指标、评估方法及终止试验的指标进行综述, 重点将当前国内、外的各种心肺运动试验方法和相应的设备方案在脑卒中患者中评估的应用进展归纳总结, 分析其优劣和可行性。

【关键词】 脑卒中; 心肺运动试验; 评估方法

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(82205065); 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515111062); 深圳市‘医疗卫生三名工程’项目资助(SZSM202111010); 深圳市第二人民医院临床科研项目(20203357021, 20203357019, 20213357022)

Funding: National Natural Science Foundation of China(82205065); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2020A1515111062); Shenzhen ‘Sanming Project’ (SZSM202111010); Shenzhen Second People’s Hospital Clinical Research Foundation (20203357021, 20203357019, 20213357022)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.06.017

脑卒中患者在发病后往往面临各种未知风险。研究表明, 脑卒中发病后前 3 个月内, 约 75% 的患者会表现出心脏改变^[1], 19.0% 的患者至少经历过 1 次严重的心脏不良事件, 67% 的患者在发病后 24 h 内会发生心律失常的异常心电图表现, 而心律失常是其发病后死亡的常见原因之一^[2]。此外, 脑卒中发病后, 大多数患者会因制动导致其运动耐力降低, 且在此类患者的康复过程中, 往往伴随高风险和低功能两大问题, 严重影响其康复治疗的进程和效果^[3-4]。

心肺运动试验(cardiopulmonary exercise testing, CPET)是通过分析运动状态下人体的呼吸气体、通气参数, 监测运动中的相关指标, 以此来评估人体心肺功能的一种方法^[5], 目前广泛应用于心肺疾病的康复中。CPET 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, 较一般的静态检查有一定的优势^[6]。目前, CPET 在脑卒中患者中的应用尚处于起步阶段, 极少部分患者在康复训练前会进行心肺功能和耐力的评估和训练, 其原因可能在于 CPET 在康复过程中的重要性尚未得到足够的重视, 以及在脑卒中患者, 尤其是重症患者中的推广应用存在一定困难。

因此, 为了提高脑卒中患者心肺功能和心血管适应性, 将 CPET 应用于患者的心肺康复便显得尤为重要。目前, 国内外针对脑卒中患者的各种改良的 CPET 方法已有相关的研究报道, 现将各种方法及其相应的设备方案的应用进展进行综述。

脑卒中患者 CPET 的适应症与禁忌证

目前, 针对脑卒中患者 CPET 的适应症和禁忌症, 在国内尚缺乏统一的规范, 参考文献和复习国外指南后, 本课题组总结有以下 2 个方面。

1. 适应症: ①病情稳定的脑卒中患者; ②功能性步行量表

(functional ambulation classification, FAC)评分 ≤ 3 分; ③认知能力正常, 简易精神状态检查表(mini-mental state examination, MMSE)评分 ≥ 24 分, 排除痴呆和听理解障碍, 确保患者能够理解测试步骤和意义。

2. 禁忌证: ①个人最近发生心脏事件, 急性心或肾功能衰竭; ②最近静息心电图发生显著变化, 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不能控制的严重高血压、控制不好的代谢性疾病如糖尿病, 严重肝肾功能不全等; 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, 如痉挛、肌肉拉伤、骨折等; ⑦外周血管疾病或下肢血管狭窄; ⑧各种原因导致的不能配合运动者^[7-10]。

脑卒中患者 CPET 的评估指标

一、峰值运动参数

有氧能力是由最大摄氧量(maximum oxygen uptake, VO_{2max})定义的, 代表心肺系统对运动的反应极限。然而, 由于脑卒中患者普遍存在神经运动功能受损、肌肉体积和氧化能力的下降等会影响运动表现的问题, 在脑卒中患者这个特殊人群中获得 VO_{2max} 有一定难度^[11], 所以另一主要参数——峰值摄氧量(peak oxygen uptake, VO_{2peak})更适合于反映运动时实际的有氧能力水平。 VO_{2peak} 虽然无法反映运动后的耗氧最高值, 但能够表示 CPET 期间达到的最高耗氧量水平, 并反映肺功能、心脏功能、骨骼肌功能、肺和外周血管功能以及自主神经功能^[12]。

此外, 有报道称, 峰值呼吸交换率(peak respiratory exchange ratio, RER_{peak})为 1.10 或更高时, 通常表明参与者在运动测试中付出了很大的努力^[11], 是检测脑卒中患者最大努力的推荐标准^[13]。

二、亚极量运动参数

评估亚极量运动参数同样重要,它们可以为评估健康状况^[14]或制定运动处方^[15]提供重要信息,包括通气无氧阈值(ventilatory anaerobic threshold, VAT)和呼吸代偿点(respiratory compensation point, RCP)。一项横断面研究结果表明,在脑卒中患者中,VAT时的摄氧量(oxygen uptake at VAT, VO_{2VAT})受运动功能的影响比 VO_{2peak} 要小,更能特异性地衡量有氧能力^[16]。其他次极量运动参数,如氧气通气当量(value of the ventilatory equivalent of oxygen, VE/VO_2)、二氧化碳通气当量(ventilatory equivalent of carbon dioxide, VE/VCO_2)和 VE/VCO_2 斜率,也可提供脑卒中患者是否存在心肺疾病及其严重程度等额外信息^[17]。

在 CPET 评估指标的信用和可靠性方面,有研究表明,VAT时的心率(heart rate at VAT, HR_{VAT})和 RCP 处的心率(heart rate at RCP, HR_{RCP})具有良好的信用,可以用来确定运动训练的推荐强度^[18]。VAT 的 VE/VO_2 、RCP 的 VE/VCO_2 和 VE/VCO_2 斜率与健康人的变异系数相当,显示出极好的可靠性^[19]。 VO_{2VAT} 和 RCP 处的摄氧量(oxygen uptake at RCP, VO_{2RCP})的信用低于 VO_{2peak} 。摄氧效率斜率(oxygen uptake efficiency slope, OUES)是一个客观的、重复性好的亚极量运动参数,与 VO_{2max} 与有很强的相关性。自觉劳累分级(rating of perceived exertion, RPE)的可靠性和重复性最差,不能作为衡量脑卒中患者运动强度的适当指标^[20]。以上参数在重测信用和可靠性方面,脑卒中患者整体低于健康人,可能的原因是其日常运动的表现水平、疲劳程度和动力水平等的变化较大所致。

脑卒中患者 CPET 评估方法和评估设备

一、反馈控制机器人辅助跑步机运动

良好的步行能力是脑卒中患者独立的重要因素,是神经康复的主要目标。考虑到特定任务的重复训练和训练环境对促进运动恢复的重要性,CPET 结合步行模式的干预策略为脑卒中患者有氧能力的评估和心肺运动试验的指导开辟了新的视角。初步研究表明,模拟步行过程中产生的心肺反应与地面行走相似^[21],步态对称性随着体重支持(body weight support, BWS)的增加而改善^[22]。体重支持的跑步机训练可以在克服运动限制的同时完成特定任务活动并产生一定的心血管效应。反馈控制方法的加入则使受试者在跑步机行走时能够对自己的表现得到及时的反馈,从而募集更多的肌群以优化运动表现,达到更高的 VO_{2peak} 。

反馈控制机器人辅助跑步机运动(feedback-controlled robotics-assisted treadmill exercise, FC-RATE)是由电动外骨骼控制双腿,跑步机 Lokomat 系统协调,电动 BWS 系统实时反馈精准减重三个部分构成的。Stoller 等^[23]在一项针对 FC-RATE 的概念验证研究中,从 3 例早期脑卒中患者中获得了合理的 CPET 运动参数,初步显示出该方法临床实施的安全性和总体依从性,也证明了利用该设备评价脑卒中后非卧床患者有氧能力和指导有氧运动是可行的。由 FC-RATE 所获得的重要心肺功能峰值参数具有良好的重测信用和重复性,这也在另一项研究^[24]中得到了证明。今后的临床实践中应该将此方案运用到更多的重症脑卒中患者中,研究外骨骼内的其他活动(如机器

人辅助行走、爬楼梯)过程中此类患者的运动表现和心肺反应将是未来研究的方向。

二、水下跑步机运动

大部分脑卒中患者由于肌肉力量和运动耐力下降而无法独立行走,因此地面跑步机训练无法适用。在这种情况下,水下跑步机步行训练更为合适。水提供的浮力可以减轻肌肉骨骼的负荷,从而降低因过度训练而受伤的风险。研究表明,水位到达剑突水平时,患者体重可平均减少 30%^[25]。此外,水还可使患者产生舒适感和安全感,具有免于跌倒风险的心理益处;其产生的阻力还可使有氧运动和阻力运动相结合,激发患者更佳的运动表现,通过增加患者的能量消耗来改善运动的效果^[26]。

Yoo 等^[27]在一项针对脑卒中患者(能够独立或在辅助器具支持下行走 10 m 以上)亚极量水下跑步机训练的研究中发现,水下跑步机步行较地面步行而言,由于静水压力增加,水下跑步会产生更多的静脉回流,受试者的每搏量会相应降低,其血压和心率变化幅度较小,可适当减轻心血管系统的负荷。这提示在脑卒中康复中,水下跑步机训练可能是一种安全有效的心肺运动试验方案。此外,水下跑步机可以在免除一定重力的情况下进行有氧运动,这意味着它可能非常适合脑卒中患者的康复,对亚急性和慢性患者提高有氧能力都有重要意义。这一结论在一项水下跑步机和地面跑步机的对比研究中得到了证实^[28]。该研究发现,这两个方案在峰值心率(HR_{peak})、 RER_{peak} 、最大年龄预测心率(Age-predicted maximal heart rate, $APHR_{max}$)和总运动持续时间方面没有差异,且 HR 和 VO_2 在两种方案中均呈显著的线性正相关。但与地面跑步机方案相比,水下跑步机方案具有更佳的峰值心肺参数表现[VO_{2peak} 更高(22.0 vs 20.0; $P=0.02$)、峰值 MET 更高(6.3 vs 5.8; $P=0.02$)和 RPE_{peak} 更低(17.6 vs 18.4; $P=0.01$)] ,患者也认为水下方案比地面方案更舒适。此外,在水下行走时的代谢成本受到水深的显著影响,Hyosok 等^[26]的研究表明,与地面步行相比,大腿深度步行的 VO_2 增加了 18%,因此大腿深度的水面应为水下跑步机心肺耐力评估的理想环境。

本课题组认为,水下跑步机训练时 VO_{2peak} 较高的原因可能是:①患者水下运动时需不断地提高步行速度,加快下肢肌肉募集,表明水下跑步机训练方案比地面训练方案更为严格;②水下跑步机训练时,如果水位淹没至剑突,患者需要在水下部分摆动手臂,这将产生额外的能量支出^[29]。

三、单臂曲柄运动试验

传统的双臂曲柄运动试验只适用于下肢不能动的截瘫患者,不适用于一侧上肢无法使用的偏瘫患者,而单臂曲柄运动试验作为一种独特的方式可以弥补这一不足。单臂曲柄运动试验要求患者在无外力支持下能够独立保持坐位 30 min 以上^[30]。Oyake 等^[30]首次将单臂曲柄运动试验应用于偏瘫患者心肺健康状况的评估当中,证明了其可行性。研究结果显示,脑卒中组 HR_{VAT} 和 VO_{2VAT} 均较健康对照组降低,因此单臂曲柄运动试验可以检测出脑卒中患者心肺功能的下降。此外,试验过程中,运动高峰时的 HR 和 VO_2 与下肢 Brunnstrom 分期无明显相关性,表明该试验可以独立于偏瘫患者下肢运动损伤的严重程度来评估其心肺功能^[30]。相比较而言,偏瘫下肢的运动障碍可能会限制运动试验的表现^[31],在自行车功率计运动试

验中,脑卒中组只有 37.5% 的人达到了 $APHR_{max}$ 的 85%,运动高峰时的 HR 和 VO_2 均明显低于健康对照组,即 VO_2 与下肢 Brunnstrom 分期显著相关,下肢严重的运动损伤则会影响心肺功能的评估。

有研究发现,单臂曲柄运动试验中,偏瘫患者和健康受试者在峰值运动时 RER_{peak} 均可达到 1.10 或更高,该结果说明,单臂曲柄运动试验确实能够检测出最大努力时的心肺反应^[32]。

四、卧式全身踏步运动试验

卧式全身踏步运动试验 (total-body recumbent stepper exercise test, TBRs-XT) 又称四肢联动,其优势在于患者使用一侧手臂和对侧腿的双向推拉往复运动,上下肢共同参与运动,如果下肢感到疲劳,上肢可以帮助完成任务,并将负荷分散到其他肌肉群上,这样的一种全体锻炼方案将有利于减少下肢早期出现的肢体疲劳^[33]。此外,由于 TBRs-XT 可以调动更多的肌群,增加患者的运动强度,从而引出更高的摄氧量和心率反应^[34]。上述研究还发现,TBRs-XT 所测得的 VO_{2peak} 大于自行车功率计所测值,而自觉呼吸困难 (Borg) 以及腿部疲劳的程度则小于自行车功率计。该结果表明,TBRs-XT 的测试结果更能反映脑卒中患者真实的心肺功能,能显著提高心肺运动处方制定的精准性,且基于 TBRs-XT 测试结果的心肺康复训练具备一定合理性^[33-34]。

Billinger 等^[35] 采用 TBRs-XT 评估了健康人群的 VO_{2peak} ,结果证实,TBRs-XT 是一项有效、可靠的运动试验,但由于过程中不能达到 VO_{2max} 和 HR_{max} ,这一试验可以用来评估峰值参数而不是最大参数。随后 Billinger 等^[36] 将改良后的卧式全身踏步运动试验 (mTBRs-XT) 进一步推广到脑卒中患者 (具有独立由坐位转换为站立位的能力,能够在借助或不借助辅助器具下独立行走) 中,通过与自行车功率计进行比较,发现两种 CPET 方案对脑卒中后心肺功能的评估有很强的相关性 (在 VO_{2peak} 和 HR_{peak} 表现上显著相关),其中 mTBRs-XT 测得的各项生理指标均高于自行车功率计,并且更多参与者使用 mTBRs-XT 达到了 $APHR_{max}$ 的 80% 或 90%。Wilson 等^[37] 的研究也证实,在脑卒中患者心肺功能的评估中,TBRs-XT 次极量运动试验具有较好的可靠性。

五、机器人辅助倾斜床运动

机器人辅助倾斜床 (Robotics-assisted tilt table, RATT) 可使患者在直立倾斜位置进行周期性下肢踏步运动,可为重症脑卒中患者的早期康复提供安全的活动和强烈的感觉运动刺激,具有身体支撑、周期性步行和生理负荷的优势。具体表现为,通过身体安全带的支撑,为身体严重虚弱或平衡功能差的脑卒中患者提供运动训练的安全保障;通过腿部和踏板绑带固定无力或痉挛的下肢^[38]。作为 CPET 的改良设备之一,Saengsuwan 等^[38] 的研究中证实,将增强型 RATT (通过添加力传感器、工作率计算系统和视觉反馈系统来增强患者的反馈) 运用于需辅助下步行的脑卒中患者心肺功能的评估中是可行的,增强型 RATT 可以帮助筛选出适用于重症脑卒中患者的心肺功能指标,并运用于预后的判断、康复方案的确定,可为重症患者提供安全、有效的早期康复。

在进行峰值运动测试时,自行车功率计和跑步机等标准设备通常只能在脑卒中恢复期患者中使用,而对于不能使用标准设备的重症脑卒中患者,RATT 有可能作为替代设备来预测相

关的心肺功能峰值参数。后续研究中,Saengsuwan 等^[39] 将 RATT 与自行车功率计和跑步机所获得的心肺功能峰值参数 (VO_{2peak} 、 HR_{peak}) 进行比较,结果发现,在 RATT 获得的 VO_{2peak} 和 HR_{peak} 虽低于其它两种设备,但具有很高的重测信度,且在 3 种设备之间呈显著的正相关,该结果证实,RATT 是进行峰值运动测试的有效设备。而 RATT 所获得的 VO_{2peak} 较低可能是由于在 RATT 上运动所需的肌群较少,以及受试者可能对 RATT 上的运动模式不太熟悉所致。

RATT 用于次极量运动阈值评估的可行性在其他相关研究中也得到了证明^[19]。虽然 RATT 所获得的 VO_{2VAT} 和 VO_{2RCP} 低于自行车功率计和跑步机,但 RATT 获得的次极量阈值参数与标准装置相关性很高,且重测信度也与标准装置相当。

脑卒中患者 CPET 终止指标

一、亚急性期和恢复期患者脑卒中患者 CPET 的终止指标

针对亚急性期和恢复期患者进行的 CPET,终止指标往往围绕血压、工作效率、心率及胸部不适问题四个方面制定。在进行 FC-RATE 时,出现异常高血压反应 (在高负荷训练时收缩压 >210 mmHg 或舒张压 >115 mmHg),或者低血压反应 (尽管工作率增加,但仍有血压下降超过 10 mmHg 的情况出现);个体工作率低于目标工作率超过 30 s;达到 $APHR_{max}$ (服用 β -受体阻滞剂者该值调整为 70%^[24]);胸部疼痛或不适为运动试验的终止指标。而在进行单臂曲柄运动试验时,若参与者达到 $APHR_{max}$ 的 85%,或者不能保持目标节奏,出现心慌、胸闷、头晕等情况时,应立即停止运动试验。

二、重症脑卒中患者 CPET 的终止指标

研究表明,重症脑卒中患者在进行 CPET 时,往往在达到最大努力之前,就可能因非心肺因素 (认知问题、肌肉无力或疲劳等) 而终止运动^[31]。在 mTBRs-XT 中,更多的参与者会因全身疲劳而终止试验^[31];终止 RATT 运动试验的三个最常见原因是腿部疲劳 (66.7%)、全身性疲劳 (11.1%) 和在高工作效率下腿部不适 (11.1%);终止跑步机试验的原因更多是呼吸困难 (44.4%);终止自行车功率计试验的主要原因是腿部疲劳 (66.7%) 和呼吸过度用力 (11.1%)^[39]。

总结与展望

综上所述,脑卒中患者 CPET 的评估对指导其运动康复具有重要价值,应当作为必要的临床推荐,推广运用至脑卒中患者的康复过程中。五种心肺运动试验的设备和方案在脑卒中患者中应用的可行性均在研究中得到了证明,在信度方面也有良好的表现,在极量运动和次极量运动中均有相关应用。其中,FC-RATE 结合步行训练,与日常生活更贴近,但适用于亚急性期和恢复期患者;FC-RASC 从步行进一步延伸至上下楼梯活动,但目前尚无研究证明其在脑卒中患者中应用的可行性,在今后的研究中有必要进一步探讨其在评估心肺耐力方面的可靠性;水下跑步机活动借助水的天然优势弥补了陆地跑步机的不足,但由于设备和场地受限,使用起来较为不便,同样适用于恢复情况较好的脑卒中患者;单臂曲柄运动试验排除了下肢活动不利对心肺运动试验顺利进行的影响,适用于能够达到坐位平衡的轻症患者;TBRs 可调动上下肢共同活动,在临床中应用

较为广泛,具备重症脑卒中患者使用的可能性;而 RATT 借助其设备优势,似乎能更有效地应用于重症患者,值得进一步研究。

本课题组认为,在评估脑卒中患者心肺功能和心肺耐力时,评估者应根据患者病情的严重程度和科室设备条件来综合考虑 CPET 的设备和方案,而将 CPET 与日常生活场景相结合,探讨用于评估重症患者心肺耐力的可靠方案是本课题组进一步的研究方向。

利益冲突声明 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Amarenco P, Lavalley PC, Labreuche J, et al. Prevalence of coronary atherosclerosis in patients with cerebral infarction[J]. *Stroke*, 2011, 42(1): 22-29. DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.584086.
- [2] Chen Z, Venkat P, Seyfried D, et al. Brain-Heart Interaction: Cardiac Complications After Stroke[J]. *Circ Res*, 2017, 121(4): 451-468. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.117.311170.
- [3] Jalal N, Gracies JM, Zidi M. Mechanical and microstructural changes of skeletal muscle following immobilization and/or stroke[J]. *Biomech Model Mechan*, 2020, 19(1): 61-80. DOI: 10.1007/s10237-019-01196-4.
- [4] Hunnicutt JL, Gregory CM. Skeletal muscle changes following stroke: a systematic review and comparison to healthy individuals[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2017, 24(6): 463-471. DOI: 10.1080/10749357.2017.1292720.
- [5] 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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2014.04.018.
- [6] 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. DOI: 10.13459/j.cnki.cjap.2015.04.011.
- [7] DeCato TW, Haverkamp H, Hegewald MJ. Cardiopulmonary exercise testing (CPET)[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 201(1): P1-P2. DOI: 10.1164/rccm.2011P1.
- [8] Löllgen H, Leyk D. Exercise testing in sports medicine[J]. *Dtsch Arztebl Int*, 2018, 115(24): 409-416. DOI: 10.3238/arztebl.2018.0409.
- [9] Mattlage AE, Ashenden AL, Lentz AA, et al. Submaximal and peak cardiorespiratory response after moderate-high intensity exercise training in subacute stroke[J]. *Cardiopulm Phys Ther J*, 2013, 24(3): 14-20. DOI: 10.1097/01823246-201324030-00003.
- [10] Sandra A, Billinger AE, Mattlage AL, et al. Aerobic exercise in subacute stroke improves cardiovascular health and physical performance[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2012, 36(4): 159-165. DOI: 10.1097/NPT.0b013e318274d082.
- [11] 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(03): 641-646. DOI: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.03.030.
- [12] Nakade T, Adachi H, Murata M, et al. Characteristics of patients with a relatively greater minimum VE/VCO₂ against peak VO₂% and impaired exercise tolerance[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2018, 118(8): 1547-1553. DOI: 10.1007/s00421-018-3884-1.
- [13] Poole DC, Jones AM. Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$; $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2017, 122(4): 997-1002. DOI: 10.1152/jappphysiol.01063.2016.
- [14] Maciejczyk M, Szymura J, Cempla J, et al. Respiratory compensation point during incremental test in overweight and normoweight boys: is it useful in assessing aerobic performance? A longitudinal study[J]. *Clin Physiol Funct I*, 2014, 34(1): 56-63. DOI: 10.1111/cpf.12064.
- [15] Inness EL, Aquilino A, Foster E, et al. Determining safe participation in aerobic exercise early after stroke through a graded submaximal exercise test[J]. *Phys Ther*, 2020, 100(9): 1434-1443. DOI: 10.1093/ptj/pzaa103.
- [16] Boyne P, Reisman D, Brian M, et al. Ventilatory threshold may be a more specific measure of aerobic capacity than peak oxygen consumption rate in persons with stroke[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2017, 24(2): 149-157. DOI: 10.1080/10749357.2016.1209831.
- [17] Sun XG, Hansen JE, Oudiz RJ, et al. Exercise pathophysiology in patients with primary pulmonary hypertension[J]. *Circulation*, 2001, 104(4): 429-435. DOI: 10.1161/hc2901.093198.
- [18] Saengsuwan J, Berger L, Schuster-Amft C, et al. Test-retest reliability and four-week changes in cardiopulmonary fitness in stroke patients: evaluation using a robotics-assisted tilt table[J]. *BMC Neurol*, 2016, 16(1): 163. DOI: 10.1186/s12883-016-0686-0.
- [19] Saengsuwan J, Nef T, Laubacher M, et al. Submaximal cardiopulmonary thresholds on a robotics-assisted tilt table, a cycle and a treadmill: a comparative analysis[J]. *Biomed Eng Online*, 2015, 14:104. DOI: 10.1186/s12938-015-0099-0.
- [20] Sage M, Middleton LE, Tang A, et al. Validity of rating of perceived exertion ranges in individuals in the subacute stage of stroke recovery[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2013, 20(6): 519-527. DOI: 10.1310/tsr2006-519.
- [21] Apte S, Plooj M, Vallery H. Influence of body weight unloading on human gait characteristics: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 73. DOI: 10.1186/s12984-018-0380-0.
- [22] Druzbicki M, Przysada G, Guzik A, et al. The efficacy of gait training using a body weight support treadmill and visual biofeedback in patients with subacute stroke: a randomized controlled trial[J]. *Bio Med Res Int*, 2018, 2018: 3812602. DOI: 10.1155/2018/3812602.
- [23] Stoller O, Schindelholz M, Bichsel L, et al. Feedback-controlled robotics-assisted treadmill exercise to assess and influence aerobic capacity early after stroke: a proof-of-concept study[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2014, 9(4): 271-278. DOI: 10.3109/17483107.2013.785038.
- [24] 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. DOI: 10.1186/1743-0003-11-145.
- [25] Andrade LS, Kanitz AC, Häfele MS, et al. Relationship between oxygen uptake, heart rate, and perceived effort in an aquatic incremental test in older women[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(22): 8324. DOI: 10.3390/ijerph17228324.
- [26] Lim H, Azurdia D, Jeng B, et al. Influence of water depth on energy expenditure during aquatic walking in people post stroke[J]. *Physiother Res Int*, 2018, 23(3): e1717. DOI: 10.1002/pri.1717.
- [27] Yoo J, Lim KB, Lee HJ, et al. Cardiovascular response during submaximal underwater treadmill exercise in stroke patients[J]. *Ann Rehabil Med*, 2014, 38(5): 628-636. DOI: 10.5535/arm.2014.38.5.628.

- [28] Lee YK, Kim BR, Han EY. Peak cardiorespiratory responses of patients with subacute stroke during land and aquatic treadmill exercise [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2017, 96(5): 289-293. DOI: 10.1097/PHM.0000000000000603.
- [29] Silva MF, Dias JM, Dela Bela LF, et al. A review on muscle activation behaviour during gait in shallow water and deep-water running and surface electromyography procedures [J]. J Body Mov Ther, 2020, 24(4): 432-441. DOI: 10.1016/j.jbmt.2020.06.005.
- [30] Oyake K, Yamaguchi T, Oda C, et al. Unilateral arm crank exercise test for assessing cardiorespiratory fitness in individuals with hemiparetic stroke [J]. Biomed Res Int, 2017, 2017: 6862041. DOI: 10.1155/2017/6862041.
- [31] Tang A, Eng JJ, Tsang TS, et al. Cognition and motor impairment correlates with exercise test performance after stroke [J]. Med Sci Sports Exerc, 2013, 45(4): 622-627. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31827a0169.
- [32] Sisante JF, Matilage AE, Arena R, et al. Decreased tidal volume may limit cardiopulmonary performance during exercise in subacute stroke [J]. J Cardiopulm Rehabil Prev, 2015, 35(5): 334-341. DOI: 10.1097/HCR.0000000000000119.
- [33] 胡菱, 姜森林, 赵冬琰, 等. 两种心肺运动试验在脑卒中偏瘫患者心肺功能评价中的对比研究 [J]. 中国老年保健医学, 2019, 17(2): 3-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2671.2019.02.001.
- [34] 钱贞, 李瑾, 高民, 等. 四肢联动在脑卒中患者心肺适能评估中运用的可行性 [J]. 临床与病理杂志, 2017, 37(11): 2445-2451. DOI: 10.3978/j.issn.2095-6959.2017.11.026.
- [35] 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. DOI: 10.1519/JSC.0b013e3181739dd7.
- [36] 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. DOI: 10.2522/ptj.20080072.
- [37] Wilson DR, Matilage 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. DOI: 10.1371/journal.pone.0172294.
- [38] Saengsuwan J, Huber C, Schreiber J, et al. Feasibility of cardiopulmonary exercise testing and training using a robotics-assisted tilt table in dependent-ambulatory stroke patients [J]. J Neuroeng Rehabil, 2015, 12: 88. DOI: 10.1186/s12984-015-0078-5.
- [39] Saengsuwan J, Nef T, Laubacher M, et al. Comparison of peak cardiopulmonary performance parameters on a robotics-assisted tilt table, a cycle and a treadmill [J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0122767. DOI: 10.1371/journal.pone.0122767.

(修回日期: 2023-05-01)

(本文编辑: 阮仕衡)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

本刊对来稿中统计学处理的有关要求

1. 统计研究设计: 应交代统计研究设计的名称和主要做法。如调查设计(分为前瞻性、回顾性或横断面调查研究); 实验设计(应交代具体的设计类型, 如自身配对设计、成组设计、交叉设计、析因设计、正交设计等); 临床试验设计(应交代属于第几期临床试验, 采用了何种盲法措施等)。主要做法应围绕 4 个基本原则(随机、对照、重复、均衡)概要说明, 尤其要交代如何控制重要非试验因素的干扰和影响。

2. 资料的表达与描述: 用 $(\bar{x} \pm s)$ 表达近似服从正态分布的定量资料, 用 $M(Q_R)$ 表达呈偏态分布的定量资料; 用统计表时, 要合理安排纵横标目, 并将数据的含义表达清楚; 用统计图时, 所用统计图的类型应与资料性质相匹配, 并使数轴上刻度值的标法符合数学原则; 用相对数时, 分母不宜小于 20, 要注意区分百分率与百分比。

3. 统计分析方法的选择: 对于定量资料, 应根据所采用的设计类型、资料所具备的条件和分析目的, 选用合适的统计分析方法, 不应盲目套用 t 检验和单因素方差分析; 对于定性资料, 应根据所采用的设计类型、定性变量的性质和频数所具备的条件以及分析目的, 选用合适的统计分析方法, 不应盲目套用 χ^2 检验。对于回归分析, 应结合专业知识和散布图, 选用合适的回归类型, 不应盲目套用简单直线回归分析, 对具有重复实验数据的回归分析资料, 不应简单化处理; 对于多因素、多指标资料, 要在一元分析的基础上, 尽可能运用多元统计分析方法, 以便对因素之间的交互作用和多指标之间的内在联系进行全面、合理的解释和评价。

4. 统计结果的解释和表达: 当 $P < 0.05$ (或 $P < 0.01$) 时, 应说明对比组之间的差异有统计学意义, 而不应说对比组之间具有显著性(或非常显著性)的差别; 应写明所用统计分析方法的具体名称(如: 成组设计资料的 t 检验、两因素析因设计资料的方差分析、多个均数之间两两比较的 q 检验等), 统计量的具体值(如 $t = 3.45$, $\chi^2 = 4.68$, $F = 6.79$ 等), 应尽可能给出具体的 P 值(如 $P = 0.0238$); 当涉及到总体参数(如总体均数、总体率等)时, 在给出显著性检验结果的同时, 再给出 95% 可信区间。