



四肢联动在脊髓损伤患者心肺功能评估中的可行性研究

张秋阳¹, 钱贞², 李瑾³, 王济红³, 陈伟¹

【摘要】 **目的** 探讨四肢联动在脊髓损伤患者心肺功能评估中的可行性。**方法** 选取徐州市中心医院康复医学科 2016—2018 年收治的脊髓损伤患者 30 例, 分别使用四肢联动、上肢功率车进行心肺运动试验 (CPET), 比较两种试验结果[包括静息心率(HR_{rest})、峰值心率(HR_{peak})、静息舒张压(DBP_{rest})、静息收缩压(SBP_{rest})、峰值舒张压(DBP_{peak})、峰值收缩压(SBP_{peak})、峰值摄氧量 (VO_{2peak})、峰值摄氧量/预测摄氧量 (VO_{2peak}/VO_{2pred})、无氧域时摄氧量 (VO_{2AT})、峰值分钟通气量 (VE_{peak})、峰值呼吸交换率 (RER_{peak})、峰值代谢当量 (MET_{peak}) 及峰值氧脉搏 (VO_2/HR_{peak})] 及试验完成即刻呼吸困难评分、腿部疲劳程度评分; 两种试验过程中 HR_{peak} 、 VO_{2peak} 的相关性分析采用 Pearson 相关分析。**结果** (1) 所有患者完成四肢联动及上肢功率车试验, 无一例出现心血管不良事件。四肢联动试验与上肢功率车试验过程中 HR_{rest} 、 DBP_{rest} 、 SBP_{rest} 、 DBP_{peak} 、 SBP_{peak} 及 VO_{2peak}/VO_{2pred} 比较, 差异无统计学意义 ($P>0.05$); 四肢联动试验过程中 HR_{peak} 、 VO_{2peak} 、 VO_{2AT} 、 VE_{peak} 、 RER_{peak} 、 MET_{peak} 及 VO_2/HR_{peak} 高于上肢功率车试验 ($P<0.05$)。 (2) Pearson 相关分析结果显示, 四肢联动与上肢功率车试验过程中 HR_{peak} ($r=0.93$)、 VO_2/HR_{peak} ($r=0.89$) 均呈正相关 ($P<0.05$)。 (3) 四肢联动试验完成即刻呼吸困难评分和腿部疲劳程度评分低于上肢功率车 ($P<0.05$)。**结论** 与上肢功率车相比, 使用四肢联动进行 CPET 能更有效地增加脊髓损伤患者运动强度, 从而更加准确地评估心肺功能, 且患者疲劳感轻微, 因此四肢联动可能更适合用于脊髓损伤患者的心肺功能评估。

【关键词】 脊髓损伤; 四肢联动; 上肢功率车; 心肺运动试验; 心肺功能; 可行性研究

【中图分类号】 R 651.2 **【文献标识码】** A DOI: 10.3969/j.issn.1008-5971.2019.11.004

张秋阳, 钱贞, 李瑾, 等. 四肢联动在脊髓损伤患者心肺功能评估中的可行性研究 [J]. 实用心脑血管病杂志, 2019, 27 (11): 16-20. [www.syxnf.net]

ZHANG Q Y, QIAN Z, LI J, et al. Feasibility of limbs linkage in evaluation of cardiopulmonary function in patients with spinal cord injury [J]. Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease, 2019, 27 (11): 16-20.

Feasibility of Limbs Linkage in Evaluation of Cardiopulmonary Function in Patients with Spinal Cord Injury

ZHANG Qiuyang¹, QIAN Zhen², LI Jin³, WANG Jihong³, CHEN Wei¹

1. Xuzhou Medical University, Xuzhou 221000, China

2. Dean Hospital of Changzhou, Changzhou 213000, China

3. Xuzhou Rehabilitation Hospital, Xuzhou 221000, China

Corresponding author: CHEN Wei, E-mail: chenwei2339@163.com

【Abstract】 **Objective** To investigate the feasibility of limbs linkage in evaluation of cardiopulmonary function in patients with spinal cord injury. **Methods** From 2016 to 2018, a total of 30 patients with spinal cord injury were selected in the Department of Rehabilitation Medicine, Xuzhou Central Hospital, and all of them carried out the cardiopulmonary exercise test (CPET) by using limbs linkage equipment and upper limb cycle ergometer, respectively. Limbs linkage equipment test results and upper limb cycle ergometer test results were compared, including HR_{rest} , HR_{peak} , DBP_{rest} , SBP_{rest} , DBP_{peak} , SBP_{peak} , VO_{2peak} , VO_{2peak}/VO_{2pred} , VO_{2AT} , VE_{peak} , RER_{peak} , MET_{peak} and VO_2/HR_{peak} during testing, as well as dyspnea score and leg fatigue degree score immediately after test; Pearson correlation analysis was used to analyze the correlation between HR_{peak} and VO_2/HR_{peak} during testing of limbs linkage equipment test and upper limb cycle ergometer test. **Results** (1) All of the 30 patients successfully completed the limbs linkage equipment test and upper limb cycle ergometer test, no one occurred cardiovascular adverse events. There was no statistically significant difference in HR_{rest} , DBP_{rest} , SBP_{rest} , DBP_{peak} , SBP_{peak} or VO_{2peak}/VO_{2pred} between limbs linkage equipment test and upper limb cycle ergometer test during testing ($P>0.05$), while HR_{peak} , VO_{2peak} , VO_{2AT} , VE_{peak} , RER_{peak} , MET_{peak} and VO_2/HR_{peak} during limbs linkage equipment test were statistically

基金项目: 徐州市科技计划项目 (KC18184)

1.221000 江苏省徐州市, 徐州医科大学 2.213000 江苏省常州市德安医院 3.221000 江苏省徐州市康复医院

通信作者: 陈伟, E-mail: chenwei2339@163.com

significantly higher than those during upper limb cycle ergometer test ($P < 0.05$). (2) Pearson correlation analysis results showed positive correlations in HR_{peak} ($r = 0.93$) and VO_2/HR_{peak} ($r = 0.89$) during testing between limbs linkage equipment test and upper limb cycle ergometer test ($P < 0.05$). (3) Dyspnea score and leg fatigue degree score immediately after limbs linkage equipment test were statistically significantly lower than those immediately after upper limb cycle ergometer test ($P < 0.05$). **Conclusion** Compared to upper limb cycle ergometer, CPET by using limbs linkage equipment test can more effectively increase the exercise intensity in patients with spinal cord injury with slighter feeling of fatigue, so as to evaluate the cardiopulmonary function more accurately, which is more applicable in the evaluation of cardiopulmonary function in patients with spinal cord injury.

【Key words】 Spinal cord injury; Limb linkage; Upper limb cycle ergomete; Cardiopulmonary exercise testing; Cardiopulmonary function; Feasibility studies

脊髓损伤是由各种原因引起脊髓结构、功能损伤而导致损伤水平以下脊髓神经功能(包括运动、感觉、括约肌及自主神经功能)障碍^[1],患者病情复杂且预后较差,常会导致终身残疾甚至危及患者生命安全^[2-3]。近年来随着交通业及工业发展,我国脊髓损伤发病率呈现逐年升高趋势,但临床尚缺乏行之有效的治疗方法。SEZER等^[4]研究表明,脊髓损伤患者因久坐不动而易发生冠心病、高血压、糖尿病等并发症,而加强心肺功能对提高脊髓损伤患者生存质量及降低并发症发生风险具有重要作用。心肺运动试验(cardiopulmonary exercise testing, CPET)是综合评价运动状态下心肺等器官整体功能和储备能力的主要检查方式,目前国外主要使用曲柄测力计、卧式四肢训练器及站姿行走器等^[5-6]行CPET以评估脊髓损伤患者心肺功能,而我国仅有脊髓损伤截瘫患者使用上肢功率车进行CPET的研究报道^[7]。本研究首次使用四肢联动进行CPET以评估脊髓损伤患者心肺功能,并探讨其在脊髓损伤患者心肺功能评估中的可行性,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取徐州市中心医院康复医学科2016—2018年收治的脊髓损伤患者30例,均符合《脊髓损伤神经学分类国际标准(2011年修订)》^[8]中的脊髓损伤诊断标准。所有患者中男21例,女9例;年龄18~64岁,平均年龄(49.2 ± 12.3)岁;体质量49.3~80.1 kg,平均体质量(62.1 ± 10.4) kg;病程3个月~2年,平均病程(1.0 ± 0.6)年。本研究经徐州市中心医院医学伦理委员会审核批准,所有患者知情并签署知情同意书。

1.2 纳入与排除标准

1.2.1 纳入标准 (1)神经损伤平面在 T_{10} 以下,美国脊髓损伤协会(ASIA)损伤分级为A级或B级;(2)坐位平衡II级或以上,上肢肌力正常,可耐受CPET;(3)脊柱稳定性良好,双下肢肌群改良Ashworth量表分级 ≤ 2 级,双下肢髋、膝、踝关节被动关节活动度(ROM)正常;(4)生命体征稳定,无自主神经反射状况,且近7 d内可以正常体力活动。

1.2.2 排除标准 (1)血压不稳定、心功能不全者;(2)合并严重心血管疾病者;(3)服用 β -受体阻滞剂等影响心率的药物者;(4)伴有颅脑创伤者;(5)出现发热、感染、褥疮等并发症者;(6)合并膀胱感染、肾结石、糖尿病、症状性低血压及有反复发作的自主神经异常反射病史者;(7)伴有严重认知障碍、抑郁等不能配合四肢联动及上肢功率车

运动者。

1.3 方法 所有患者使用四肢联动、上肢功率车行CPET,试验前勿饱餐或长时间空腹,勿吸烟或饮用浓咖啡;试验时穿宽松、舒适的运动鞋、袜子和衣服;试验前0.5 h,根据仪器制造商指示将运动心肺功能测试及代谢分析系统(型号:K4b2,意大利COSMED公司生产)做好气体标定、容量标定和流量标定。此外,在评估室配备氧气、除颤仪、急救药品等,以确保患者试验过程中安全。

1.3.1 四肢联动 准备好四肢联动设备(型号:MINI-7005 II,北京蓝田医疗设备有限公司生产)并与运动心肺功能测试及代谢分析系统联机,之后将受试者安全地转移到四肢联动设备上,调整好座椅前后距离及手柄长度(以便于受试者发力为宜)。该四肢联动设备共有16档阻力并配有阻力显示屏,每一小格代表一档阻力,可手动加减阻力(见图1)。根据受试者性别、年龄及运动习惯等选择1~2档/2 min的阻力递增方案(阶梯式递增方案)进行症状限制性最大递增CPET,受试者接好面罩以保证不漏气、连接呼出气采集管及心电监测设备、袖带血压,静坐3 min;然后握持四肢联动把手开始运动,无功率负荷热身运动3 min,配备秒表节律器,帮助测试者将转速主动保持在(60 ± 5) r/min,于递增负荷下运动8~12 min,结束后休息6 min恢复。其中心电监测从静坐开始持续至运动恢复末,观察患者心电图变化;血压于开始运动前检测1次,运动后每隔2 min检测1次,直至运动恢复末。为了确保运动的安全性,参照美国运动医学会(American College of Sports Medicine, ACSM)运动终止标准^[9]及时终止CPET。运动终止后仍需对患者进行密切观察,包括心电图、血压及患者感受,监测时间至少持续3 min以上,如心电图存在ST-T段改变和心律失常则应延长监测时间。

1.3.2 上肢功率车 所有患者于四肢联动试验后第2天同一时间段使用上肢功率车(型号:THERA-VITAL,德国麦迪卡公司生产)进行CPET,具体如下:首先,将上肢功率车平放于地面,安全固定,调节手柄高度至最合适位置(见图2),之后受试者进入测试场所并取坐位,将运动心肺功能测试及代谢分析系统与上肢功率车联机。根据受试者性别、年龄和运动习惯等选择5~15 W/min的功率递增方案(斜坡式递增方案)进行症状限制性最大递增CPET。测试过程及试验终止标准同四肢联机试验。

1.4 观察指标 记录所有患者使用四肢联动及上肢功率车行



图1 四肢联动
Figure 1 Limbs linkage



图2 上肢功率车
Figure 2 Upper limb cycle ergometer

CPET 结果, 包括静息心率 (HR_{rest})、峰值心率 (HR_{peak})、静息舒张压 (DBP_{rest})、静息收缩压 (SBP_{rest})、峰值舒张压 (DBP_{peak})、峰值收缩压 (SBP_{peak})、峰值摄氧量 (VO_{2peak})、峰值摄氧量 / 预测摄氧量 (VO_{2peak}/VO_{2pred})、无氧域时摄氧量 (VO_{2AT})、峰值分钟通气量 (VE_{peak})、峰值呼吸交换率 (RER_{peak})、峰值代谢当量 (MET_{peak}) 及峰值氧脉搏 (VO_2/HR_{peak})。CPET 完成即刻采用 Borg 主观自觉劳累分级表^[10] 评估患者呼吸困难及腿部疲劳程度, 总分 6~20 分, 评分越高提示患者呼吸困难及腿部疲劳程度越严重。

1.5 统计学方法 应用 SPSS 16.0 统计学软件进行数据处理, 计量资料以 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 组间比较采用两独立样本 t 检验; 四肢联动与上肢功率车试验过程中 HR_{peak} 、 VO_{2peak} 相关性分析采用 Pearson 相关分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 四肢联动与上肢功率车试验结果比较 所有患者完成四肢联动及上肢功率车试验, 无一例出现心血管不良事件。

四肢联动与上肢功率车试验过程中 HR_{rest} 、 DBP_{rest} 、 SBP_{rest} 、 DBP_{peak} 、 SBP_{peak} 及 VO_{2peak}/VO_{2pred} 比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 四肢联动试验过程中 HR_{peak} 、 VO_{2peak} 、 VO_{2AT} 、 VE_{peak} 、 RER_{peak} 、 MET_{peak} 及 VO_2/HR_{peak} 高于上肢功率车, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$, 见表 1)。

2.2 相关性分析 Pearson 相关分析结果显示, 四肢联动与上肢功率车试验过程中 HR_{peak} ($r=0.93$)、 VO_2/HR_{peak} ($r=0.89$) 均呈正相关 ($P < 0.05$)。

2.3 四肢联动与上肢功率车试验完成即刻呼吸困难评分和腿部疲劳程度评分比较 四肢联动试验完成即刻呼吸困难评分和腿部疲劳程度评分低于上肢功率车试验, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$, 见表 2)。

表 1 四肢联动与上肢功率车试验结果比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Comparison of limbs linkage equipment test results and upper limb cycle ergometer test results

试验设备	例数	HR_{rest} (次/min)	HR_{peak} (次/min)	DBP_{rest} (mm Hg)	SBP_{rest} (mm Hg)	DBP_{peak} (mm Hg)	SBP_{peak} (mm Hg)
四肢联动	30	81.7 ± 9.3	142.4 ± 15.1	77 ± 5	126 ± 10	96 ± 11	154 ± 27
上肢功率车	30	83.0 ± 10.0	133.1 ± 16.6	75 ± 5	124 ± 9	95 ± 11	152 ± 24
t 值		1.693	3.177	0.847	1.065	1.989	2.071
P 值		0.303	0.047	0.693	0.452	0.109	0.118

试验设备	VO_{2peak} ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	VO_{2peak}/VO_{2pred} (%)	VO_{2AT} ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	VE_{peak} (L/min)	RER_{peak}	MET_{peak}	VO_2/HR_{peak} (ml/次)
四肢联动	16.32 ± 5.35	34.83 ± 9.94	14.66 ± 3.27	69.49 ± 11.38	3.59 ± 0.60	3.95 ± 0.97	8.54 ± 1.13
上肢功率车	13.89 ± 6.20	34.65 ± 10.39	10.23 ± 4.71	57.83 ± 9.25	2.81 ± 0.49	3.06 ± 0.78	6.69 ± 1.08
t 值	5.394	1.246	4.288	6.015	5.191	4.843	4.254
P 值	0.025	0.399	0.041	0.033	0.028	0.017	0.016

注: HR_{rest} = 静息心率, HR_{peak} = 峰值心率, DBP_{rest} = 静息舒张压, SBP_{rest} = 静息收缩压, DBP_{peak} = 峰值舒张压, SBP_{peak} = 峰值收缩压, VO_{2peak} = 峰值摄氧量, VO_{2peak}/VO_{2pred} = 峰值摄氧量 / 预测摄氧量, VO_{2AT} = 无氧域时摄氧量, VE_{peak} = 峰值分钟通气量, RER_{peak} = 峰值呼吸交换率, MET_{peak} = 峰值代谢当量, VO_2/HR_{peak} = 峰值氧脉搏; 1 mm Hg = 0.133 kPa

表2 四肢联动与上肢功率车试验完成即刻呼吸困难评分和腿部疲劳程度评分比较 ($\bar{x} \pm s$, 分)

Table 2 Comparison of dyspnea score and leg fatigue degree score immediately after limbs linkage equipment test and upper limb cycle ergometer test

试验设备	例数	呼吸困难评分	腿部疲劳程度评分
四肢联动	30	8.48 ± 0.65	9.29 ± 0.44
上肢功率车	30	15.82 ± 1.39	14.21 ± 0.97
<i>t</i> 值		4.217	5.430
<i>P</i> 值		0.011	0.030

3 讨论

脊髓损伤患者康复过程较长, 导致其运动量减少及体能降低, 易并发心血管疾病^[4, 11]。因此, 及时、准确地评估脊髓损伤患者心肺功能成为当前的研究热点。CPET 是一种在负荷递增运动过程中反映机体循环、呼吸、血液、代谢等多系统功能动态变化的检查手段, 是临床公认的评价机体心肺功能的“金标准”^[12-13]。而脊髓损伤患者存在肌肉瘫痪、肌张力异常、站立平衡功能损伤等问题, 因此采用 CPET 评估患者心肺功能较为受限。既往研究表明, CPET 与特定运动设备(如上肢功率车等)动态联用可判断脊髓损伤患者心肺功能, 预测患者心血管疾病发生风险^[14-15]; 但临床实践中发现, 使用上肢功率车行 CPET 仅利用了患者的上肢功能, 而躯干、下肢残存肌肉功能未参与运动, 因此存在因不能动员全身肌肉做功而导致测量指标低于实测值的情况^[16-18]。四肢联动是四肢均参与运动的联动设备, 运动过程中可利用上下肢运动并调动更多肌肉群, 除双上肢推拉动作用以外还结合双下肢交互蹬踏运动, 并带动部分躯干活动, 可行性好且安全、有效; 此外, 还可能增加患者运动强度, 进而引起更高的摄氧量及心率反应^[10, 19]。

本研究首次使用四肢联动对脊髓损伤患者进行 CPET 以评估其心肺功能, 结果显示, 四肢联动与上肢功率车试验过程中 HR_{rest} 、 DBP_{rest} 、 SBP_{rest} 、 DBP_{peak} 、 SBP_{peak} 及 VO_{2peak}/VO_{2pred} 间无统计学差异, 但四肢联动试验过程中 HR_{peak} 、 VO_{2peak} 、 VE_{peak} 、 RER_{peak} 、 MET_{peak} 及 VO_2/HR_{peak} 高于上肢功率车试验。无氧阈指骨骼肌尚未出现乳酸堆积情况下负荷递增运动过程中机体最大限度地利用最大摄氧量的百分比, 可有效反映机体骨骼肌的运动耐力^[7]。本研究结果显示, 四肢联动试验过程中 VO_{2AT} 高于上肢功率车试验, 提示与上肢功率车相比, 使用四肢联动进行 CPET 可更有效地增加脊髓损伤患者运动强度, 从而在更接近实际运动情况下分析患者心肺功能, 与既往研究结果相一致^[10, 19]。

本研究结果显示, 四肢联动与上肢功率车试验过程中 HR_{peak} 、 VO_2/HR_{peak} 均高度相关, 提示使用四肢联动评估脊髓损伤患者心肺功能是有效、可靠的。本研究结果还显示, 四肢联动试验完成即刻呼吸困难评分和腿部疲劳程度评分低于上肢功率车, 提示与上肢功率车相比, 使用四肢联动进行 CPET 的脊髓损伤患者疲劳感轻微, 分析其原因可能为四肢联动整合了躯干运动和四肢运动, 当受试者腿部乏力时可借助上肢及躯干力量协助下肢运动, 从而减轻腿部运动负荷, 防

止因下肢局部疲劳而过早终止。

综上所述, 与上肢功率车相比, 采用四肢联动进行 CPET 能更有效地增加脊髓损伤患者运动强度, 从而更加准确地评估心肺功能, 且患者疲劳感轻微, 因此四肢联动可能更适合用于脊髓损伤患者的心肺功能评估, 具有一定推广应用价值。

本文链接

不同临床目的及生理状态下检测到的心肺运动试验 (CPET) 指标的处理原则也不尽相同, 从优化临床诊疗应用的角度考虑 CPET 主要指标处理如下: (1) 静息状态值平均其最后 120 s 的数据; (2) 热身状态值平均其最后 30 s 的数据; (3) 最大极限运动状态值平均其最后 30 s 的数据; (4) 在无氧阈 (AT) 状态时的氧耗量值基本以 10 s 值为准; (5) 恢复期数值多以恢复 1 或 2 min 时的 10 s 值表示。

参考文献

- [1] AHUJA C S, WILSON J R, NORI S, et al. Traumatic spinal cord injury [J]. Nat Rev Dis Primers, 2017, 3: 17018. DOI: 10.1038/nrdp.2017.18.
- [2] KUDO D, MIYAKOSHI N, HONGO M, et al. An epidemiological study of traumatic spinal cord injuries in the fastest aging area in Japan [J]. Spinal Cord, 2019, 57 (6): 509-515. DOI: 10.1038/s41393-019-0255-7.
- [3] JAZAYERI S B, BEYGI S, SHOKRANEH F, et al. Incidence of traumatic spinal cord injury worldwide: a systematic review [J]. Eur Spine J, 2015, 24 (5): 905-918. DOI: 10.1007/s00586-014-3424-6.
- [4] SEZER N, AKKUS S, UGURLU F G. Chronic complications of spinal cord injury [J]. World J Orthop, 2015, 6 (1): 24-33. DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.24.
- [5] BRESNAHAN J J, FARKAS G J, CLASEY J L, et al. Arm crank ergometry improves cardiovascular disease risk factors and community mobility independent of body composition in high motor complete spinal cord injury [J]. J Spinal Cord Med, 2019, 42 (3): 272-280. DOI: 10.1080/10790268.2017.1412562.
- [6] AKKURT H, KARAPOLAT H U, KIRAZLI Y, et al. The effects of upper extremity aerobic exercise in patients with spinal cord injury: a randomized controlled study [J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2017, 53 (2): 219-227. DOI: 10.23736/S1973-9087.16.03804-1.
- [7] 范亚蓓, 王盛, 王翔, 等. 上肢功率车在脊髓损伤截瘫患者心肺运动试验中的应用研究 [J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32 (11): 1231-1235. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2017.11.005.
- [8] 美国脊髓损伤协会, 国际脊髓损伤学会, 李建军, 等. 脊髓损伤神经学分类国际标准 (2011 年修订) [J]. 中国康复理论与实践, 2011, 17 (10): 963-971. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2011.10.009.
- [9] 王正珍. ACSM 运动测试与运动处方指南 [M]. 9 版. 北京: 北京体育大学出版社, 2014: 54-56.
- [10] 钱贞, 陈伟, 李瑾, 等. 四肢联动在健康青年人心肺适能评估中应用的可行性分析 [J]. 中国全科医学, 2018, 21 (35): 4340-4345. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2018.00.067.

- [11] CHOPRA A S, MIYATANI M, CRAVEN B C. Cardiovascular disease risk in individuals with chronic spinal cord injury: prevalence of untreated risk factors and poor adherence to treatment guidelines [J]. *J Spinal Cord Med*, 2018, 41 (1) : 2-9. DOI: 10.1080/10790268.2016.1140390.
- [12] GUAZZI M, BANDERA F, OZEMEK C, et al. Cardiopulmonary Exercise Testing [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 70 (13) : 1618-1636. DOI: 10.1016/j.jacc.2017.08.012.
- [13] LECLERC K. Cardiopulmonary exercise testing: A contemporary and versatile clinical tool [J]. *Cleve Clin J Med*, 2017, 84 (2) : 161-168. DOI: 10.3949/ccjm.84a.15013.
- [14] EERDEN S, DEKKER R, HETTINGA F J, et al. Maximal and submaximal aerobic tests for wheelchair-dependent persons with spinal cord injury: a systematic review to summarize and identify useful applications for clinical rehabilitation [J]. *Disabil Rehabil*, 2018, 40 (5) : 497-521. DOI: 10.1080/09638288.2017.1287623.
- [15] AU J S, SITHAMPARAPILLAI A, CURRIE K D, et al. Assessing ventilatory threshold in individuals with motor-complete spinal cord injury [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2018, 99 (10) : 1991-1997. DOI: 10.1016/j.apmr.2018.05.015.
- [16] DEVEAU K M, HARMAN K A, SQUAIR J W, et al. A comparison of passive hindlimb cycling and active upper-limb exercise provides new insights into systolic dysfunction after spinal cord injury [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2017, 313 (5) : H861-870. DOI: 10.1152/ajpheart.00046.2017.
- [17] MELO F C M, DE LIMA K K F, SILVEIRA A P K F, et al. Physical training and upper-limb strength of people with paraplegia: a systematic review [J]. *J Sport Rehabil*, 2019, 28 (3) : 288-293. DOI: 10.1123/jsr.2017-0062.
- [18] PETERSEN J A, SPIESS M, CURT A, et al. Upper limb recovery in spinal cord injury: involvement of central and peripheral motor pathways [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31 (5) : 432-441. DOI: 10.1177/1545968316688796.
- [19] 潘钰, 徐泉, 杨晓辉, 等. 定量评估有氧运动对脊髓损伤患者心肺功能的影响 [J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23 (4) : 415-419. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2017.04.011.
- (收稿日期: 2019-08-23; 修回日期: 2019-11-08)
(本文编辑: 谢武英)

(上接第 15 页)

- [20] PANG M Y, CHARLESWORTH S A, LAU R W, 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. DOI: 10.1159/000346075.
- [21] BAERT I, DALY D, DEJAEGER E, et al. Evolution of cardiorespiratory fitness after stroke: a 1-year follow-up study. Influence of prestroke patients' characteristics and stroke-related factors [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012, 93 (4) : 669-676. DOI: 10.1016/j.apmr.2011.09.022.
- [22] BRUBAKER P H, KITZMAN D W. Chronotropic incompetence: causes, consequences, and management [J]. *Circulation*, 2011, 123 (9) : 1010-1020. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.110.940577.
- [23] BILLINGER S A, BOYNE P, COUGHENOUR E, et al. Dose aerobic exercise and the FITT principle fit into stroke recovery? [J]. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2015, 15 (2) : 519. DOI: 10.1007/s11910-014-0519-8.
- [24] SUTBEYAZ S T, 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. DOI: 10.1177/0269215509358932.
- [25] TSENG B Y, KLUDING P. The relationship between fatigue, aerobic fitness, and motor control in people with chronic stroke: a pilot study [J]. *J Geriatr Phys Ther*, 2009, 32 (3) : 97-102.
- [26] RAND D, ENG J J, LIU-AMBROSE T, et al. Feasibility of a 6-month exercise and recreation program to improve executive functioning and memory in individuals with chronic stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2010, 24 (8) : 722-729. DOI: 10.1177/1545968310368684.
- (收稿日期: 2019-07-13; 修回日期: 2019-11-07)
(本文编辑: 谢武英)