

文章编号:1004-7220(2015)01-0008-06

行走过程中不同背包负重方式对 人体生理参数的影响

赵美雅¹, 倪义坤¹, 田山¹, 唐桥虹¹, 王丽珍¹, 樊瑜波^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 科技部“空天生物技术与医学工程”国际联合研究中心, 北京 100191; 2. 国家康复辅具研究中心, 北京 100179)

摘要: **目的** 针对背包重物集中放置在底部的传统集中式负重方式, 研究将重物分散放置的非均匀负重方式对人体生理参数的影响。 **方法** 非均匀负重分布方式主要将背包空间按上、下、左、右分为4个空间, 重物按1/2:1/2、1/4:3/4和3/4:1/4三种比例放在左下和右上两个位置, 剩余两个空间用对应体积大小的塑料泡沫填充。利用肌电测量系统和三维运动捕捉系统测量10名健康志愿者以1.1 m/s的速度在跑步机上负重10%自身体重行走30 min前后姿势、肌肉疲劳、心率和血压的变化, 以及停止行走后0、5、10和15 min时肌电参数变化情况。 **结果** 右上位置负重增加明显, 导致斜方肌肌肉疲劳上升和前倾角增大, 相同背包重量下非均匀分布方式与传统负重方式对肌肉疲劳的影响区别不大, 左下和右上重量比为3/4:1/4的分布方式对身体姿势影响不明显。此外, 将重物同比例左下右上放置比传统负重方式更有利于降低对心率和血压的影响。 **结论** 采取合理的重量分布方式可保证躯干姿势不受影响, 同时有利于降低对心率和血压的影响。因此, 背包设计可考虑重物交叉分布, 且对等式分布质量。

关键词: 重心位置; 躯体姿势; 肌肉疲劳; 分布方式; 背包

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.01.008.

Effects of different load distribution modes on human physiological parameters during walking

ZHAO Mei-ya¹, NI Yi-kun¹, TIAN Shan¹, TANG Qiao-hong¹, WANG Li-zhen¹, FAN Yu-bo^{1,2} (1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, International Joint Research Center of Aerospace Biotechnology and Medical Engineering, Ministry of Science and Technology of China, Beijing 100191, China; 2. National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of unevenly-distributed backpack loads on human physiological parameters as compared to the traditional centrally-placed load at the backpack bottom. **Methods** For the unevenly-distributed load mode, the backpack was divided into four spaces including top right, top left, bottom right and bottom left. The loads were divided into two parts proportionally (1/2:1/2, 1/4:3/4 and 3/4:1/4) and placed at the bottom left and top right of the backpack, respectively. The remaining two spaces were filled with the plastic foam. Ten healthy volunteers performed 30-min walking trials on the treadmill at the speed of 1.1 m/s with the backpack load equal to 10% body weight (BW). The changes of subjects' body posture, muscle fatigue, heart rate, blood pressure before and after the trial, as well as the electromyography (EMG) changes at

收稿日期:2013-12-21; 修回日期:2014-02-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11120101001, 11202017, 11322223), 教育部博士点基金项目(20121102120039, 20131102130004), 北京市自然科学基金项目(7133245), 高等学校学科创新引智计划资助(B13003), 国家科技支撑计划项目(2012BAI18B05, 2012BAI18B07)。

通信作者:王丽珍, 硕士研究生导师, Tel:(010)82339861; E-mail:lizhenwang@buaa.edu.cn。

0, 5, 10, 15 min after the trial were measured by the Bortec AMT-8 and the NDI Optotrak Certus. **Results** The muscle fatigue of right upper trapezius and forward-leaning angle increased as the loads at top right of the backpack increased. However, the muscle fatigue in the new mode of backpack load distribution showed no significant differences as compared to the traditional mode under the same backpack loads. The new mode with the load ratio of 3/4: 1/4 had no significant effects on posture. The new mode with the load ratio of 1/2: 1/2 could contribute to the decrease of heart rate and blood pressure as compared to the traditional mode. **Conclusions** Adopting a new and more reasonable load distribution mode can guarantee the body posture unaffected by the backpack loads, and decrease heart rate and blood pressure. Therefore, the cross and evenly distributed load mode is recommended for the backpack design.

Key words: Gravity center; Body posture; Muscle fatigue; Distribution modes; Backpack

背包作为一种普遍式负载运输方式,常发生在学生上学、野外求生、军事行军及登山训练等过程^[1]。人体背负过重物体或承重过长时间都会导致背部损伤^[2]。据报道,青少年低背痛、脊柱侧弯、过度驼背和前凸等肌骨系统疾病与背包负重密切相关^[3-7]。同时,背包负重导致儿童/青少年时期的背痛还会对其成年后的肌骨系统健康造成影响^[8]。目前,越来越多的学者关注不同负重方式对人体行进运动的影响,研究参数包括负重前后肌肉疲劳程度、身体姿势变化情况、步态变化等^[9-15]。减小背包重量有利于降低负重对人体造成的不利影响,背包重心位置优化亦能在一定程度上降低可能的损伤。

现有背包负重方式中重物在背包中均是集中放置,如高背部、中背部、低背部、右下背部和左下背部;虽然背包重心位置不同,但重物均自然搁置一处。Stuempfle 等^[10]研究了重物集中在背部高、中、低位时对人体能量消耗和主观反应的影响。Simpson 等^[1]和 Frank 等^[11]分析了重物集中在背部高、中、低不同位置对人体躯干姿势角度的影响。Bobet 等^[14]研究了重物集中放置在背部高、低位时对背部肌电活动的影响。Pascoe 等^[16]和 Chansirinukor 等^[17]将重物集中在左下背部或右下背部,探讨了单肩背包对颈肩姿势和步态的影响。理论上讲,集中力作用较均布载荷作用对物体局部造成的应力更为集中。

本文提出将重物分散放置的非均匀负重分布方式。该分布方式首先将背包空间按上、下、左、右分为 4 个空间,随后将重物按一定比例放在左上和右下或左下和右上位置,剩余两个空间用对应体积大小的塑料泡沫填充,这种放置方式同时使重物在上、下、左、右各有分配,综合研究了非均匀负重分布方式下行走前后负重对躯体与头部前倾角、肌电 (electromyography, EMG) 和心率等参数的影响,以

期从生物力学和生理学角度为背包设计提供科学依据,改进背包负重方式,减少疲劳和损伤。

1 材料与方法

选取 10 名大学生志愿者参加实验,其中男、女性各 5 名(见表 1)。年龄、身高和体重选择尽量相差较小,减小个体差异性对实验的影响,志愿者体质指数 (body mass index, BMI) 均在正常范围之内。所有志愿者身体健康状况良好,无心血管疾病和肌肉损伤,实验前 24 h 内未从事剧烈运动,以保证志愿者肌肉的良好状态。所有志愿者实验前均须体验了解实验过程,并自愿参加实验。

表 1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m ⁻²)
男	24.6 ± 1.5	172.2 ± 6.1	66.4 ± 11.6	21.9 ± 2.1
女	23.8 ± 0.8	165.0 ± 4.9	50.0 ± 7.9	20.8 ± 1.7

在正式实验中,志愿者背包(李宁公司,中国)负重 在跑步机上以 1.1 m/s 的速度行走。背包内重物重量为自身体重 (body weight, BW) 的 10%。首先将背包空间按上、下、左、右分为 4 个空间,随后将 10% BW 的重物按 1/2: 1/2、1/4: 3/4 和 3/4: 1/4 三种比例放在左下和右上位置,剩余两个空间用对应体积大小的塑料泡沫填充。在每种负重分布方式下志愿者行走 30 min,在行走前和行走后静止站立在同一位置进行数据测量,并在行走后无背包负重的开始 15 min 内,每 5 min 测量一次肌电数据。

为避免实验时间和志愿者疲劳对结果的影响,本实验同一志愿者转换实验模式的间隔时间大于 15 min。为避免实验模式的先后顺序对结果造成影响,实验模式转换次序采用随机选择性。

利用 NDI Optotrak Certus 三维运动捕捉系统 (Northern Digital Inc, 加拿大) 测量志愿者躯体与头部前倾角。通过记录粘贴在人体右侧关节直径 4 mm 的标志点的位置计算相应角度, 标志点分别在耳屏、肩峰锁骨关节、股骨大转子。忽略标志点因人体运动而引起的相对位移。

采用 Bortec AMT-8 表面肌电仪 (Bortec 生物医学公司, 加拿大) 连接银/氯化银一次性电极来测量竖脊肌和斜方肌的 EMG 数据^[18-21]。两电极间隔约 20 mm, 粘贴在对应肌肉的肌腹, 并与肌纤维方向顺应。采样频率为 1 kHz, EMG 数据传送到放大器放大 500 倍后输出, 每次稳定采集时间为 20 s。每次实验前后用多功能血压计 (欧姆龙, 日本) 对志愿者实验前后心率血压变化进行测量。

首先对肌电原始信号进行去噪预处理, 随后在 20 s 数据中每隔 5 s 选取 2 s 计算平均功率频率 (mean power frequency, MPF) 值, 最终得到其均值, 代表该段数据体现的肌肉疲劳程度^[22]。本文选择 MPF 用于肌肉疲劳分析, 是因为该参数对噪声的不敏感性和在肌肉持续收缩中表现出的对生物力学和生理学过程的强敏感性^[23]。MPF 值随频谱压缩左移意味着肌肉的疲劳。为研究不同非均匀负重分布方式对肌肉疲劳的影响, 用负重为 0% BW 时的 MPF 值标准化非均匀负重分布方式下测得的 MPF 值, 非均匀负重分布方式所设总重量为 10% BW, 按 3 种方式分配在背包左下和右上两个空间: 左下和右上均为 1/2 的 10% BW (方式 1)、左下和右上分别为 3/4 的 10% BW 和 1/4 的 10% BW (方式 2), 左下和右上分别为 1/4 的 10% BW 和 3/4 的 10% BW (方式 3)。另外, 本研究中的传统方式指 10% BW 的背包重物放在背部 L1 ~ 5 间, 即低位时的背包方式。同时, 为显示时间的影响, 用 0 min 时的 MPF 值标准化其他各时间点。NDI 运动捕捉系统记录标志点位置, 通过坐标转换计算头部和躯体前倾角, 角度定义如图 1 所示。采用 ANOVA 方法对数据进行统计学分析, 研究在每种负重分布方式下行走时间对参数的影响。

2 结果

2.1 EMG 信号分析

不同非均匀负重分布方式下负重行走前后右侧

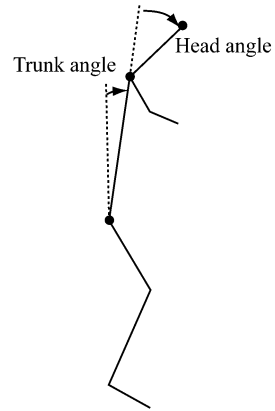


图 1 前倾角定义示意图

Fig. 1 Definition of the forward-leaning angle

斜方肌和右侧竖脊肌 EMG 信号的 MPF 值变化如图 2 所示。在行走 30 min 后, 两种肌肉的 MPF 值均下降, 在随后的 15 min 休息时间里, MPF 值逐渐恢复, 且在每种负重分布方式下经过 15 min 的休息, MPF 值均能恢复到初始状态。对于右侧斜方肌, 在传统方式和方式 2 下行走 30 min 后 MPF 值有所下降, 而无显著性; 但方式 1、3 下行走 30 min 后 MPF 值均有所下降, 且行走前和 15 min 休息末的 MPF 值均与行走后的 MPF 值有显著差异。右侧斜方肌肌肉疲劳随着右上侧重量的增加而上升。

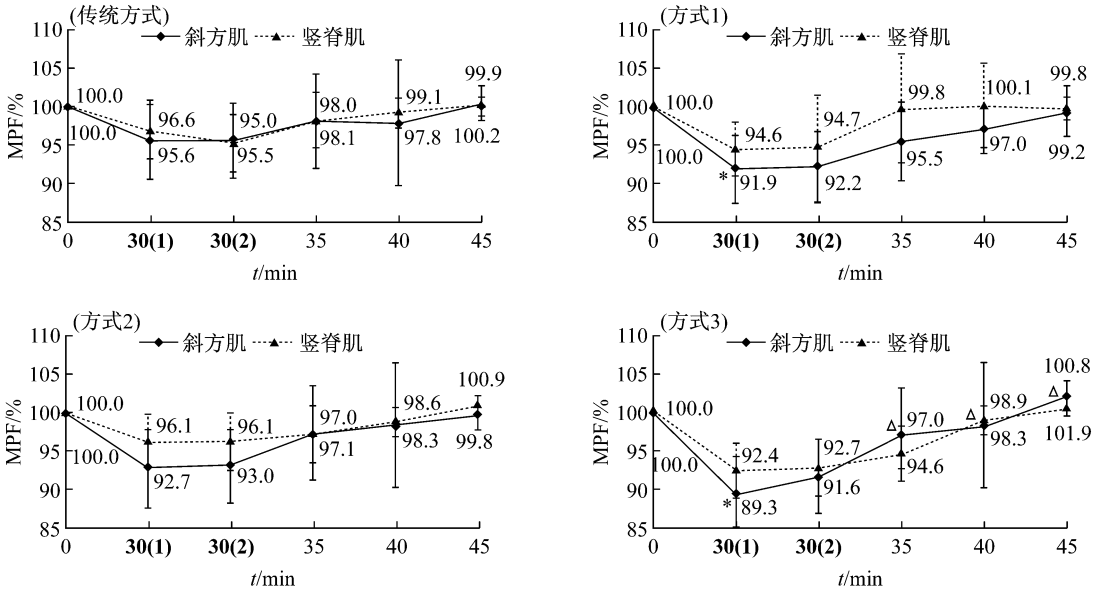
非均匀负重分布方式下行走 30 min 后, 斜方肌 EMG 信号的 MPF 值与传统负重方式相比无显著性差异。对于右侧竖脊肌, 4 种方式下行走 30 min 后的 MPF 值均有所下降, 且下降程度相近, 行走前后的 MPF 值没有显著差异。非均匀负重分布方式下行走 30 min 后的竖脊肌 EMG 信号 MPF 值与传统负重方式相比, 也无显著性差异。

2.2 姿态分析

图 3 所示为不同非均匀负重分布方式对躯体和头部前倾角的影响。对躯体前倾角来说, 方式 1、3 下右侧躯体前倾角度显著大于传统负重方式, 而方式 2 与传统负重方式之间无显著性变化。方式 1、3 下头部前倾角大于传统负重方式, 但是 3 种非均匀负重分布方式与传统集中式负重方式相比, 均无显著性变化。

2.3 心率血压分析

图 4、5 所示为不同非均匀负重分布方式对心率和血压的影响。方式 1 下心率变化要显著小于传统



30(1)-负重行走 30 min 后,负重站立下测量; 30(2)-负重行走 30 min 后,卸去负重站立下测量

图2 不同负重分布方式下斜方肌和竖脊肌 MPF 随时间变化情况 (* 相比 0 min, ^ 相比 30(1) 时有显著差异, P < 0.05)

Fig. 2 MPF of trapezius and erector spinae under different load distribution modes

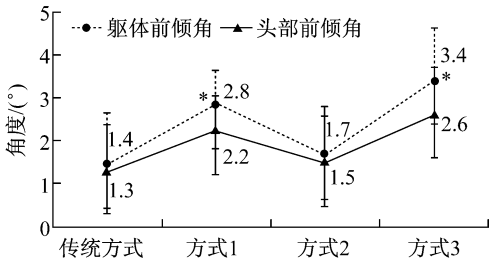


图3 不同负重分布方式下躯体与头部前倾角变化 (* 相比传统方式, P < 0.05)

Fig. 3 Forward-leaning angle of the body and head under different load distribution modes

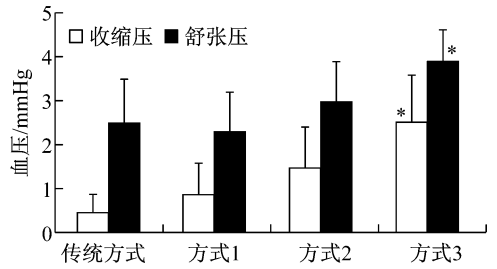


图5 不同负重分布方式下 30 min 行走前后收缩/舒张压变化 (* 相比传统方式, P < 0.05, 1 mmHg = 0.133 kPa)

Fig. 5 Systolic and diastolic blood pressures under different load distribution modes before/after 30-min walking

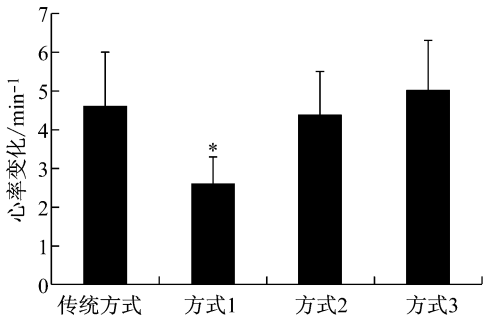


图4 不同负重分布方式下 30 min 行走前后心率变化 (* 相比传统方式, P < 0.05)

Fig. 4 Heart rate under different load distribution modes before/after 30-min walking

负重方式。方式 2、3 与传统负重方式对心率的影响相近,无显著性差异。方式 3 下血压的变化要显著大于传统负重方式和其他两种非均匀负重分布方式。方式 1、2 与传统负重方式相比,收缩压和舒张压均无显著性差异。

3 讨论

背包负重会影响人体生理机能。背包重量和重心位置对人体影响方面的研究结果表明,减小背包重量和优化背包重心位置均有利于减少负重对人体造成的影响^[18-19,24-25]。本文主要针对现有背包负重

方式中背包重物在背部均是集中放置的现象,提出一种新的非均匀负重分布方式,并从肌肉疲劳、姿势、心率和血压4个方面研究该分布方式与传统集中式负重方式对人体的影响。

本文结果显示,非均匀负重分布方式下两种肌肉的疲劳经过15 min休息均能恢复到行走前的状态,且行走30 min前后右侧竖脊肌的肌肉疲劳没有显著性变化,而斜方肌的肌肉疲劳随着右上侧重量的增加而上升,尤其是在方式1、3下斜方肌肌肉疲劳在行走前后发生显著变化。背包重心在背部高位较低位时更容易疲劳^[14]。Bobet等^[14]关于不同位置下平均肌电幅值的研究结果也显示,负重重心在较低位置时EMG信号明显低于负重重心在高位时的信号,故建议背部负重时尽量将背包重心放在接近臀部的位置,即背部低位。但是与传统集中式负重分布方式相比,行走30 min后斜方肌和竖脊肌的肌肉疲劳均无显著性差异,故认为采取交叉非均匀负重分布方式与传统方式相比,对肌肉疲劳影响不大。

在躯体和头部前倾角方面,在方式1、3下躯体和头部前倾角度均要大于传统集中式负重方式,且随着右上部位重量的增加,躯体和头部前倾角相应增加。已有研究发现,背包重心在高位较低位引起的前倾角度要大。但是3种非均匀负重分布方式下的头部前倾角度与传统集中式负重方式相比无显著性差异,且在方式2下躯体和头部前倾角与传统集中式负重方式之间无明显区别。因此,合理的背包负重分布方式可保证人体姿势不受影响。

非均匀负重分布方式对人体背部肌肉和姿势的影响与背包重量在高位的比重有关。该分布方式的重物放置设计是对角式的,在两个对角空间设置不同重量比例时会产生身体左右两侧重量不等的情况,而本研究中只测试了人体右侧的参数,此非均匀负重分布方式是否会因背包重量侧倾而引起损伤还需要进一步研究。

从非均匀负重分布方式对心率影响结果可知,方式1下心率变化要显著小于传统集中式负重方式,其余两种分布方式下的心率则与传统负重方式无明显区别;从该结果可以推断,方式1的分布方式可以减少心率的变化。这一结果与文献^[1]中的结果相符,该研究发现志愿者主观更偏向于将背包置于高位,即高位可能给志愿者更为舒适的主观感受。

而方式3下心率要大于方式1,可能是由于左右两侧重物不均衡所致,这方面仍需进一步研究。在血压方面,方式3下血压的变化要显著大于传统集中式负重方式和其他两种分布方式,而方式1、2与传统负重方式相比,收缩压和舒张压均无显著性差异。因此,本研究认为将重物交叉分布且对重量比例进行合理设计,有利于降低负重对心率和血压的影响。

4 结论

本文研究了非均匀负重分布方式对肌肉疲劳、躯体与头部前倾角、心率和血压参数的影响。在10% BW负重下,非均匀负重分布方式与传统集中式负重方式相比,两者对肌肉疲劳的影响无显著差异;同时,左下和右上重量比为3/4:1/4时的分布方式(方式2)对人体姿势影响较小,左下和右上重量比为1/2:1/2时的分布方式(方式1)相比传统集中式负重方式有利于减少负重对心率和血压的影响。综上所述,在10% BW负重下,非均匀负重分布方式对肌肉疲劳影响不大,采取合理的重量比例和负重方式可对躯干姿势有所影响,同时合理的负重方式还有利于降低心率和血压。因此,采用重物交叉分布方式进行合理设计有利于降低对人体心率和血压的影响。然而,本文中非均匀负重分布方式采用重物对角式分布,两个对角空间的重量比例不同会产生身体左右两侧受力不均造成偏差,而本文只测试了人体右侧的参数,进一步的研究中将对此进行细化分析研究。

参考文献:

- [1] Simpson KM, Munro BJ, Steele JR. Does load position affect gait and subjective responses of females during load carriage [J]. *Appl Ergon*, 2012, 43(3): 479-485.
- [2] Birrell SA, Haslam RA. Subjective skeletal discomfort measured using a comfort questionnaire following a load carriage exercise [J]. *Mil Med*, 2009, 174(2): 177-182.
- [3] Mehta TB, Thorpe DE, Freburger JK. Development of a survey to assess backpack use and neck and back pain in seventh and eighth graders [J]. *Pediatr Phys Ther*, 2002, 14(4): 171-184.
- [4] Moore MJ, White GL, Moore DL. Association of relative backpack weight with reported pain, pain sites, medical utilization, and lost school time in children and adolescents

- [J]. *J School Health*, 2007, 77(5): 232-239.
- [5] Navuluri N, Navuluri RB. Study on the relationship between backpack use and back and neck pain among adolescents [J]. *Nurs Health Sci*, 2006, 8(4): 208-215.
- [6] Korovessis P, Koureas G, Zacharatos S, *et al.* Backpacks, back pain, sagittal spinal curves and trunk alignment in adolescents: A logistic and multinomial logistic analysis [J]. *Spine*, 2005, 30(2): 247-255.
- [7] Lai JP, Jones AY. The effect of shoulder-girdle loading by a school bag on lung volumes in Chinese primary school children [J]. *Early Hum Dev*, 2001, 62(1): 79-86.
- [8] Jones GT, Macfarlane GJ. Epidemiology of low back pain in children and adolescents [J]. *Arch Dis Child*, 2005, 90(3): 312-316.
- [9] Brackley HM, Stevenson JM, Selinger JC. Effect of backpack load placement on posture and spinal curvature in pre-pubescent children [J]. *Work*, 2009, 32(3): 351-360.
- [10] Stuempfle KJ, Drury DG, Wilson AL. Effect of load position on physiological and perceptual responses during load carriage with an internal frame backpack [J]. *Ergonomics*, 2004, 47(7): 784-789.
- [11] Frank E, Stevenson JM, Stohart P. The effect of load placement on static posture and reaction forces in youth [J]. *Med Sci Sport Exercise*, 2003, 35(5): S21.
- [12] Chow DK, Ou ZY, Wang XG, *et al.* Short-term effects of backpack load placement on spine deformation and repositioning error in schoolchildren [J]. *Ergonomics*, 2010, 53(1): 56-64.
- [13] Grimmer K, Dansie B, Milanese S, *et al.* Adolescent standing postural response to backpack loads: A randomised controlled experimental study [J]. *BMC Musculoskeletal Disord*, 2002, 3(1): 10.
- [14] Bobet J, Norman RW. Effects of load placement on back muscle activity in load carriage [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1984, 53(1): 71-75.
- [15] 莫仕围, 李静先. 儿童背不同质量书包步态终止时的动力学分析[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(4): 379-387.
- Mo SW, Li JX. Kinetics analysis on gait termination for children with backpacks [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(4): 379-387.
- [16] Pascoe DD, Pascoe DE, Wang YT, *et al.* Influence of carrying book bags on gait cycle and posture of youths [J]. *Ergonomics*, 1997, 40(6): 631-640.
- [17] Chansirinukor W, Wilson D, Dansie B. Effects of backpacks on students: Measurement of cervical and shoulder posture [J]. *Aust J Physiother*, 2001, 47(2): 110-120.
- [18] Hong Y, Li JX, Fong DT. Effect of prolonged walking with backpack loads on trunk muscle activity and fatigue in children [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2008, 18(6): 990-996.
- [19] Bobet J, Norman RW. Use of the average electromyogram in design evaluation Investigation of a whole-body task [J]. *Ergonomics*, 1982, 25(12): 1155-1163.
- [20] 胡淑娴, 施俊. 基于希尔伯特-黄变换的肌电图估计肌肉疲劳研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2011, 28(2): 243-247.
- [21] 黄强民, 王凤湖, 范帅. 静态姿势下均匀负重和非负重时躯干和表面肌电活动[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(4): 369-374.
- Huang QM, Wang FH, Fan S. Movement of trunk and surface electromyography under symmetric loading and unloading with static posture [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(4): 369-374.
- [22] 赵美雅, 王丽珍, 马键, 等. 人体头低脚高仰卧时下肢被动运动对背部肌肉疲劳的影响[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(4): 366-371.
- Zhao MY, Wang LZ, Ma J, *et al.* Effect of passive motion from lower extremity on muscle fatigue when the back under head-down tilting [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(4): 366-371.
- [23] De Luca CJ. The use of surface electromyography in biomechanics [J]. *J Appl Biomech*, 1997, 13(2): 135-163.
- [24] Li JX, Hong Y, Robinson PD. The effect of load carriage on movement kinematics and respiratory parameters in children during walking [J]. *Euro J Appl Physiol*, 2003, 90(1-2): 35-43.
- [25] Hong Y, Cheung CK. Gait and posture responses to backpack load during level walking in children [J]. *Gait Posture*, 2003, 17(1): 28-33.