

文章编号: 1004-7220(2023)03-0580-07

# 背包类型对大学生楼梯行走运动学和足底压力的影响

闫可<sup>a</sup>, 刘艺辉<sup>a</sup>, 张泽毅<sup>a</sup>, 张美珍<sup>a</sup>, 武晓刚<sup>b</sup>, 陈维毅<sup>b</sup>

(太原理工大学 a. 体育学院; b. 生物医学工程学院, 太原 030024)

**摘要:**目的 分析不同背包类型和载荷对大学生上楼梯行走时运动学和足底压力的影响,为大学生选择合适的背包及携带方式提供参考。方法 采用 Nokov 红外光点运动捕捉系统和 Podomed 足底压力测试系统分析 15 名男大学生上楼梯支撑期内躯干和下肢关节活动范围、峰值时刻下肢运动学参数、足底各分区压力峰值、接触时间、全足最大压强、平均压强等参数的差异。结果 5% BW 和 10% BW 背包载荷会减小躯干旋转活动范围(range of motion, ROM),增加踝关节屈伸和内外翻 ROM,10% BW 背包载荷下足底第 1、3 跖骨压力峰值和全足最大压强提升( $P<0.05$ )。单肩包和手提包减小躯干侧倾和旋转 ROM,增大了踝关节屈伸 ROM、髌关节屈曲角、足弓和足跟内侧压力峰值( $P<0.05$ )。双肩包负重增加足趾区的压力峰值( $P<0.05$ )。结论 楼梯行走时,5% BW 和 10% BW 背包载荷均会限制躯干旋转,增加踝关节 ROM,10% BW 载荷还会增加足趾区的负荷。单侧负重模式会使躯干向未负重侧倾斜以及向负重侧旋转。携带双肩包时足趾处的压力较高,而单肩包和手提包主要集中在增加足弓和足跟内侧压力。建议大学生群体选择对称性背包方案,同时合理分配背包重量避免导致足趾区的损伤。

**关键词:** 运动学; 负重; 背包; 足底压力; 楼梯行走

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.03.023

## Effects of Backpack Types on Kinematics and Plantar Pressure in College Students During Stair Walking

YAN Ke<sup>a</sup>, LIU Yihui<sup>a</sup>, ZHANG Zeyi<sup>a</sup>, ZHANG Meizhen<sup>a</sup>, WU Xiaogang<sup>b</sup>, CHEN Weiyi<sup>b</sup>

(a. College of Physical Education, b. College of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract: Objective** To analyze the influence of different backpack types and loads on kinematics and plantar pressure of college students during stair climbing, so as to provide references for choosing the appropriate backpack and carrying modes. **Methods** The Nokov infrared light point motion capture system and Podomed plantar pressure system were used to analyze the differences in the range of motion (ROM) of the trunk and lower limb joints, the kinematic parameters at the peak time, the peak pressure of each plantar partition, the contact time, the maximum pressure of the whole foot, the average pressure and the maximum contact area for 15 male college students during the support period of stair climbing. **Results** The 5% BW and 10% BW backpack loads reduced ROM of trunk rotation, increased ROM of ankle flexion/extension and varus/valgus. The 10% BW backpack loads increased the peak pressure of the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> metatarsals bones and the maximum pressure of

收稿日期:2022-06-30; 修回日期:2022-07-15

基金项目:山西省基础研究计划自由探索类项目(202103021224109),首批新文科研究与改革实践项目(2021050026),山西省回国留学人员科研资助项目(2020-032),山西省高等学校哲学社会科学研究项目(201801015),山西省研究生教育教学改革课题(2021YJG067),太原理工大学学科建设经费

通信作者:张美珍,教授,硕士生导师,E-mail:meizhen1116@163.com

the whole foot ( $P < 0.05$ ). Single-shoulder bag and handbag reduced ROM of trunk tilting and rotation, and increased ROM of ankle flexion and extension, hip flexion angle, peak pressure of foot arch and medial heel ( $P < 0.05$ ). The double-shoulder bag loads increased peak pressure in the toe area ( $P < 0.05$ ). **Conclusions** During walking on the stairs, the 5% BW and 10% BW backpack loads limited trunk rotation and increased ankle ROM. The 10% BW loads also increased the load in metatarsal area. The unilateral weight-bearing mode would make the trunk tilt to the unload side and rotate to the weight-bearing side. The pressure in toe area was higher when carrying double-shoulder bag, while single-shoulder bag and handbag mainly increased the pressure of arch foot and medial heel. It is suggested that college students choose symmetrical backpack scheme, and wisely allocate backpack weight to avoid the injury of foot area.

**Key words:** kinematics; load; backpack; plantar pressure; stairs walking

背包是生活中常见的物品携带方式,多应用于学生上学、军事训练和日常出行。Jones等<sup>[1]</sup>研究指出,大学生每天佩戴书包的时间通常超过30 min。由于习惯、个性差异等原因,其携带的背包类型(如双肩包、单肩包、手提包等)及佩戴方式(如单肩包单侧悬挂、斜挎悬挂等)各异。研究表明,背包引起学生群体的肌肉骨骼不适和损伤报告正逐年增加,高达75%青少年经历过由背包带来的背部疼痛;不合理的背包方式和过大载荷会增加躯干前倾和脊柱侧弯程度,增加颈椎和躯干肌肉活动,影响躯干在额状面的平衡<sup>[2-4]</sup>。

已有学者探索不同背包携带方式和重心位置对身体的影响。单侧负重的背包会抑制躯干和骨盆的旋转<sup>[5]</sup>;对角式负重方式可能增加躯干前倾和斜方肌活动<sup>[6]</sup>;背包前后负重会抑制躯干旋转,减小步长,增加下肢关节力矩<sup>[7]</sup>;与对称负重相比,不对称负重压力中心(center of pressure, COP)偏移更大,行走更不稳定<sup>[8]</sup>。由此可见,背包从外部施加给人体的载荷会改变人体重心的位置,导致躯干和下肢关节必须调整姿势和步态特征以适应外加载荷。然而,关于背包佩戴最佳位置和背包最适载荷(10% BW vs 15% BW)(BW, body weight, 体重)的观点仍未统一<sup>[9-10]</sup>。还有学者分析背包载荷下足底压力变化特征,(0%~20%) BW的双肩包载荷会逐渐使小学生足趾区以及第1~3跖骨区的压力升高<sup>[11]</sup>;固定2.5 kg双肩包负重会使儿童足跟和第1、2跖骨压强增大<sup>[12]</sup>。前人研究主要集中于儿童、青少年等特殊群体,忽略了大学生这一背包使用群体。并且以往研究实验设计中背包类型及携带方式设置单一,主要探讨平地行走的特征,鲜有

关于其他类型的步道(如楼梯、坡道)的研究报道。楼梯行走作为大众普遍的出行方式,其步态参数与平地相比有很大差别<sup>[13]</sup>。因此,如何选择更优的背包类型值得探索。

本研究分析不同背包类型和负重质量对大学生上楼行走时身体姿势和足底压力分布的影响,同时设立两个研究假设:① 10% BW 背包载荷会限制躯干水平面活动,升高足跖区的压力;② 与双肩包相比,单肩包和手提包使行走时躯干偏离中立位置。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

招募健康、无下肢损伤的男性大学生为受试者。通过G \* Power软件计算当达到0.80的统计检验力<sup>[5]</sup>,一类误差概率设为0.05,效应量值为0.25时,实验所需最少样本量为9人,本实验最终纳入受试者15人,身高(173±4.1) cm,体质量(73.1±7.2) kg,年龄(22.0±1.2)岁,满足实验样本量。正式实验前告知其实验过程,并签署知情同意书。

### 1.2 数据采集

本实验采用的楼梯共5阶,阶长、阶高和阶深分别为1.50、0.17、0.30 m,符合居民住宅标准(阶长≥1.1 m,阶高≤0.175 m,阶深≥0.26 m),在第2台阶放置Podomed足底压力测试仪(见图1)<sup>[14]</sup>。

有研究指出,大学生每天携带背包约为10% BW<sup>[15]</sup>,结合前人研究<sup>[3,5]</sup>与生活实际,本文设置载荷为0% BW、5% BW和10% BW。此外,采用市面上常见的3种背包(见图2)及背带方式进行测试(见表1)。受试者更换统一的紧身服装,由同一操作人

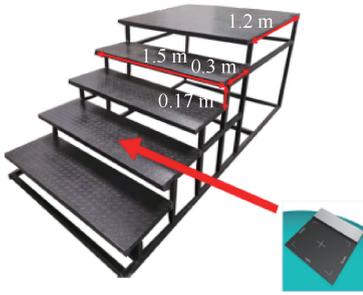


图1 实验楼梯及足底压力设备放置

Fig. 1 Experimental stairs and placement of plantar pressure equipment



图2 实验背包类型

Fig. 2 Types of experimental backpack (a) Double-shoulder bag, (b) Single-shoulder bag, (c) Handbag

表1 背包类型及佩戴方式分类

Tab. 1 Classification of backpack types and wearing methods

组别	负重类型	佩戴方式	着力点	载荷/BW
双肩包	对称	双肩悬挂	双肩肩峰	0%、5%、10%
单肩包A	单侧	右侧悬挂	右肩峰内侧	0%、5%、10%
单肩包B	单侧	左侧斜挎悬挂	左肩峰内侧	0%、5%、10%
手提包	单侧	右手悬挂	右手	0%、5%、10%

员依据 Helen Hayes 模型贴点方案为受试者粘贴反光标志点<sup>[16]</sup>。运用 Nokov Mars 2H 红外光点三维运动捕捉系统和足底压力分析系统采集受试者在不同背包负重下以正常速度裸足上楼梯时的生物力学参数,采样频率分别为 200、100 Hz,每个动作均采集 3 次有效数据。

### 1.3 数据处理

运用 Cortex-64 2.6.2 (Motion Analysis 公司,美

国)软件对运动学数据进行处理,根据反光标志点建立人体环节多刚体模型,采用欧拉角计算下肢三维角度。第 1 次转动围绕  $x$  轴,获得屈伸角(正角为屈曲和躯干前倾),第 2 次转动围绕  $y$  轴,获得内收外展角(正角为内收和躯干左倾),第 3 次转动围绕  $z$  轴,获得旋内旋外角(正角为旋内和躯干左旋)。所有标志点三维坐标采用 Butterworth 低通滤波进行平滑(截断频率为 13 Hz)。本研究分析上楼行走时支撑期矢状面、额状面及水平面峰值角度(峰值角度定义为支撑期间运动学角度最大值)、关节活动范围(range of motion, ROM,定义为支撑时刻起到离地结束时刻最大角度与最小角度之差值)。支撑时刻定义为右腿第 1 和第 5 跖趾关节或足跟反光标志点垂直速度为 0 m/s 时<sup>[16]</sup>。

运用 P-Plate-scientific 进行足底压力数据处理,按标号将足底分为如图 3 所示的 10 个区域:第 1 趾骨(T1)、第 2~5 趾骨(T2~5)、第 1 跖骨(M1)、第 2 跖骨(M2)、第 3 跖骨(M3)、第 4 跖骨(M4)、第 5 跖骨(M5)、足弓(MF)、足跟内侧(HM)和足跟外侧(HL),分析足着地期间各区压力峰值、接触时间、全足平均压强、全足最大压强以及足底最大接触面积。

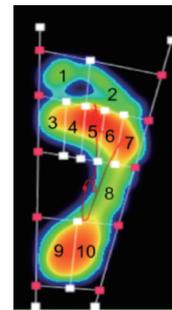


图3 足底分区示意图

Fig. 3 Diagram of plantar division

### 1.4 统计分析

统计分析在 SPSS 22.0 软件中完成,运用  $3 \times 4$  重复设计双因素方差分析确定不同体重载荷与不同背包条件下行走时各参数的差异。若存在交互作用,则用单因素方差分析比较不同载荷与背包类型之间的差异。主效应差异采用 LSD 进行校正,其显著性标准定为一类误差概率不大于 0.05。

## 2 研究结果

双因素方差分析结果显示,载荷和背包类型对所有参数均无显著交互作用( $P>0.05$ )。

### 2.1 躯干运动学

不论背包类型,5% BW 和 10% BW 较 0% BW 下躯干水平面 ROM 显著降低,躯干右倾角、左旋角峰值减小( $P<0.05$ )。不论载荷,双肩包较单肩包 A 相

比表现出较大的躯干额状面、水平面 ROM 和右倾角、左旋角峰值,较小的躯干左倾角峰值( $P<0.05$ );较单肩包 B(左肩斜挎单肩包)相比有较大的躯干额状面、水平面 ROM,右倾角和左旋角峰值,较小的右倾角峰值( $P<0.05$ );较手提包相比有较大的躯干水平面 ROM 和左旋角峰值,较小的躯干左倾角峰值( $P<0.05$ )。某些参数标准差较大,推测原因是原始数据有正值和负值导致均值在 $0^\circ$ 附近(见图4)。

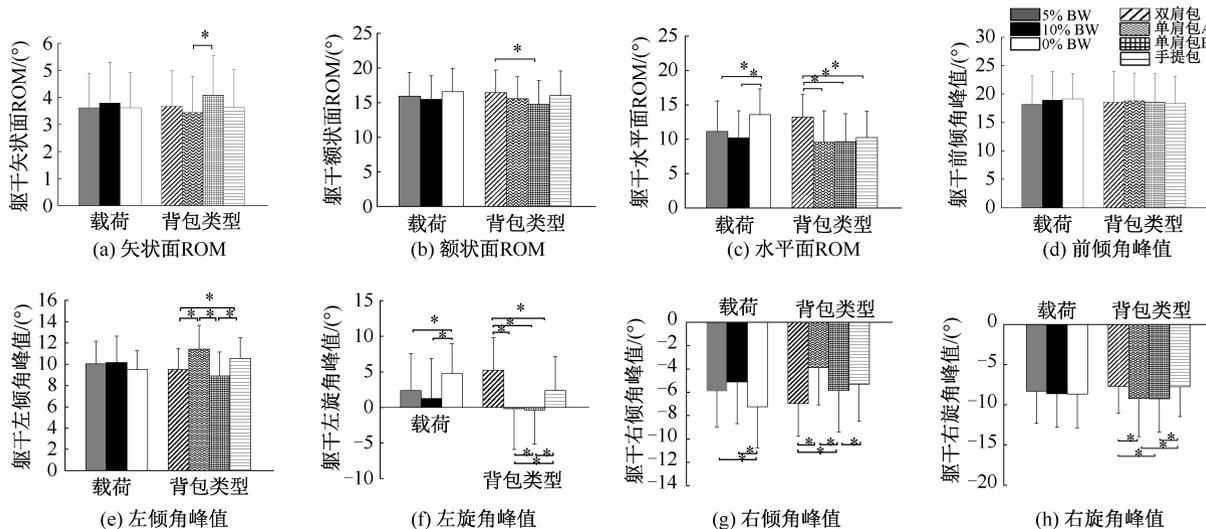


图4 载荷与背包类型对躯干运动学影响

Fig. 4 Effects of load and backpack type on trunk kinematics (a) Sagittal plane ROM, (b) Frontal plane ROM, (c) Horizontal plane ROM, (d) Peak anteversion angle, (e) Peak left tilt angle, (f) Peak left rotation angle, (g) Peak right tilt angle, (h) Peak right rotation angle

注:躯干运动学负值代表后倾、右倾或右旋。\* $P<0.05$ 。

### 2.2 下肢运动学

不论载荷,与双肩包相比,使用单肩包 B 和手提包时髌屈曲角峰值和踝关节矢状面 ROM 显著增大( $P<0.05$ )。不论背包类型,与 0% BW 相比,5% 和 10% BW 下踝关节矢状面、额状面 ROM 显著增加( $P<0.05$ ),见表 2。

### 2.3 足底压力

不论背包类型,与 0% BW 相比,10% BW 下受试者 M1、M3 处压力峰值显著提升( $P<0.05$ )。不论载荷,双肩包 T1、T2~5 区压力峰值显著高于单肩包和手提包, MF、HM 区压力峰值显著小于手提包, HM 区压力峰值显著小于单肩包,双肩包 T1、T2~5、M5、M1、MF、HM 区接触时间显著低于手提包, T2~5 区接触时间显著高于单肩包 B 组, M1、HM 区接触时间显著低于单肩包 B 组( $P<0.05$ ),见表 3。

不论背包类型,5% 和 10% BW 与 0% BW 相比,全足最大压强显著升高( $P<0.05$ )。其余参数均无显著性差异( $P>0.05$ ),见表 4。

## 3 讨论

### 3.1 躯干运动学特征

本研究结果支持第 1 个研究假设。5% BW 和 10% BW 背包载荷抑制了躯干旋转活动,前倾幅度无变化。而赵功赫等<sup>[7]</sup>研究表明,躯干后负重 20 kg 时躯干前倾显著增加。本研究与之不同的原因为后者采用负重架的载荷模式与背包不完全相同,且该研究的载荷(20 kg)与本研究载荷(0~8 kg)相比较。一项行军研究测试结果表明,27.2% BW 背包行走 15 min 后,躯干矢状面 ROM 增加,较高的 BW 载荷会造成躯干过度前倾<sup>[17]</sup>。赵美

表2 载荷与背包类型对下肢关节运动学影响

Tab. 2 Effects of load and backpack type on lower limb kinematics

(°)

关节	参数	载荷			背包类型			
		0% BW	5% BW	10% BW	双肩包	单肩包 A	单肩包 B	手提包
髋	矢状面 ROM	52.0±3.7	52.3±4.1	52.5±4.6	52.4±3.7	52.0±4.6	52.5±5.0	52.6±3.0
	额状面 ROM	11.1±3.5	12.2±3.2	11.7±3.6	12.5±3.6	11.5±3.6	12.0±4.1	11.7±3.5
	水平面 ROM	11.0±4.4	11.3±3.9	11.0±3.7	11.6±3.4	11.2±3.9	11.0±4.1	10.8±4.0
	屈曲角峰值	66.9±7.7	66.7±7.4	66.9±7.8	65.8±8.7	67.0±8.0	67.6±7.4 <sup>b</sup>	67.2±7.9 <sup>b</sup>
	内翻角峰值	4.6±3.5	4.9±3.4	4.2±3.6	5.3±3.6	4.5±3.5	4.6±3.4	3.9±3.5
	外翻角峰值	-6.5±2.7	-7.3±2.7	-7.4±2.7	-7.2±2.6	-7.0±2.5	-7.4±2.8	-7.8±2.9
	内旋角峰值	10.2±7.8	10.3±6.1	9.1±5.8	9.6±6.6	9.3±4.8	10.5±5.8	9.5±6.3
	外旋角峰值	-0.8±7.1	-1.0±5.6	-1.9±5.6	-2.0±6.2	-1.9±5.0	-0.5±5.0	-1.4±6.2
膝	矢状面 ROM	52.8±5.5	51.9±5.9	52.3±6.6	52.2±6.8	52.5±6.8	51.8±6.1	51.9±5.5
	额状面 ROM	6.6±3.0	6.6±2.7	6.5±2.7	6.4±2.7	6.9±2.6	6.6±2.8	6.4±2.7
	水平面 ROM	10.0±4.2	10.5±4.2	10.4±4.0	9.7±3.5	11.4±5.0	10.4±4.1	10.3±4.1
	屈曲角峰值	65.1±4.0	65.6±5.0	66.3±6.0	65.5±5.1	66.3±6.5	66.1±5.1	66.0±5.3
	内翻角峰值	4.7±4.1	4.8±3.9	4.7±4.0	4.8±4.1	5.1±4.0	4.6±3.8	4.4±3.0
	外翻角峰值	-1.9±2.5	-1.9±2.3	-1.9±2.3	-1.6±2.4	-1.8±2.2	-2.0±2.4	-2.0±2.3
	内旋角峰值	23.0±8.0	22.2±8.6	22.2±8.9	21.7±8.6	22.8±9.1	22.2±8.6	22.1±8.7
	外旋角峰值	-1.9±2.5	-1.9±2.3	-1.9±2.3	-1.6±2.4	-1.8±2.2	-2.0±2.4	-2.0±2.3
踝	矢状面 ROM	30.1±7.7	32.7±5.9 <sup>a</sup>	32.6±5.7 <sup>a</sup>	31.6±4.8	33.2±7.0 <sup>b</sup>	33.6±5.9 <sup>b</sup>	32.2±5.2
	额状面 ROM	15.5±4.9	17.6±5.4 <sup>a</sup>	17.7±5.3 <sup>a</sup>	17.0±5.0	17.7±5.6	18.0±5.7	17.9±5.2
	水平面 ROM	7.0±3.9	7.5±4.0	7.2±4.0	6.6±3.4	7.6±3.9	7.4±4.4	7.7±4.3
	背屈角峰值	2.7±3.5	3.8±4.3	4.3±4.5	4.1±4.2	4.2±4.7	4.5±4.8	3.3±3.9 <sup>c</sup>
	跖屈角峰值	-27.4±5.3	-29.0±5.7	-28.4±5.3	-27.6±5.0	-29.0±6.5	-29.1±5.4	-29.0±4.8
	内翻角峰值	13.2±6.9	14.1±7.3	13.9±7.4	13.5±7.5	14.3±7.1	14.0±7.2	14.1±7.7
	外翻角峰值	-2.3±9.1	-3.6±9.6	-3.8±9.9	-3.6±9.9	-3.4±9.5	-4.0±9.0	-3.8±10.6
	内旋角峰值	19.7±8.2	20.3±8.5	20.4±8.7	19.9±8.2	20.0±8.8	20.5±8.0	20.8±9.4

注:下肢运动学负值代表伸展、外翻或外旋。<sup>a</sup>表示与0%载荷相比具有显著性差异( $P<0.05$ );<sup>b</sup>表示与双肩包相比具有显著性差异( $P<0.05$ );<sup>c</sup>表示与单肩包 A 相比具有显著性差异( $P<0.05$ );<sup>d</sup>表示与单肩包 B 相比具有显著性差异( $P<0.05$ )。下同。

表3 载荷与背包类型对足底压力峰值和接触时间的影响

Tab. 3 Effects of load and backpack type on plantar pressure peak and contact time

参数	分区	载荷			背包类型			
		0% BW	5% BW	10% BW	双肩包	单肩包 A	单肩包 B	手提包
压力峰值/N	T1	180.9±19.2	194.4±22.6	201.6±25.3	204.4±28.5	193.2±22.7 <sup>b</sup>	203.7±19.8	190.6±23.1 <sup>b</sup>
	T2~5	144.8±39.7	154.4±21.5	157.1±26.1	166.3±25.5	149.5±20.2 <sup>b</sup>	155.9±27.1	156.6±21.8 <sup>b</sup>
	M1	193.6±40.0	203.9±34.6	201.0±44.6 <sup>a</sup>	199.1±42.1	204.4±41.0	204.7±36.3	201.6±41.4
	M2	217.1±34.8	229.9±30.2	227.2±34.3	226.4±36.7	227.7±34.0	233.7±26.4	226.6±31.1 <sup>d</sup>
	M3	229.3±33.3	246.0±26.8	248.6±27.1 <sup>a</sup>	249.1±29.7	248.9±30.7	248.3±20.4	242.8±26.2
	M4	242.0±27.7	257.7±25.3	254.1±24.1	259.1±21.0	257.3±25.5	261.7±20.3	245.4±29.2
	M5	210.3±19.6	225.2±26.4	231.3±32.3	234.6±29.5	229.7±26.6	231.9±24.9	216.8±34.7
	MF	170.7±37.2	175.3±32.4	175.3±42.6	166.4±39.1	176.0±29.8	174.2±38.2	184.8±42.6 <sup>b</sup>
	HM	229.3±29.2	244.5±25.1	252.4±21.1	243.4±25.6	243.3±20.1	254.0±24.2 <sup>b</sup>	249.2±23.8 <sup>b</sup>
	HL	233.7±19.5	240.0±22.3	239.4±22.3	234.8±24.4	242.1±22.2	242.8±21.9	239.0±20.7
接触时间/ms	T1	751.4±79.4	732.2±64.2	745.9±65.0	733.5±66.2	710.3±65.5	747.4±54.2	766.0±61.6 <sup>bc</sup>
	T2~5	729.3±75.9	677.3±96.4	697.8±64.9	692.2±78.8	664.7±101.4	673.7±62.0 <sup>b</sup>	720.2±75.7 <sup>b</sup>
	M1	757.2±97.9	729.3±81.4	743.9±90.7	719.3±97.5	695.6±92.3	761.5±62.4 <sup>b</sup>	771.4±66.5 <sup>bc</sup>
	M2	824.6±91.2	806.9±67.2	803.7±69.6	790.7±78.9	791.9±74.8	813.6±54.2	822.3±57.9
	M3	848.5±95.2	830.9±67.8	828.6±67.2	823.4±72.5	812.6±75.2	835.3±62.1	825.9±59.9
	M4	850.4±90.7	834.9±67.8	834.9±65.4	817.1±69.6	816.8±70.4	842.7±63.5	851.7±57.4
	M5	777.0±87.3	768.3±65.6	768.3±72.0	737.4±71.2	751.2±54.8	776.7±77.7	798.7±66.0 <sup>b</sup>
	MF	683.5±88.7	664.3±82.2	651.0±70.3	631.9±71.3	655.0±79.3	659.5±88.7	684.8±58.6 <sup>b</sup>
	HM	695.1±101.5	604.1±78.7	651.6±80.9	646.7±82.6	635.5±89.5	660.0±72.3 <sup>b</sup>	689.7±65.7 <sup>b</sup>
	HL	502.3±49.2	508.3±80.4	496.3±77.9	496.2±98.8	467.2±71.5	508.6±69.8	539.1±84.5

表4 各组全足压强及最大接触面积比较

Tab. 4 Comparison of full foot pressure and maximum contact area in each group

参数	载荷			背包类型			
	0% BW	5% BW	10% BW	双肩包	单肩包 A	单肩包 B	手提包
最大压强/kPa	137±68	151±90 <sup>a</sup>	167±94 <sup>a</sup>	161±113	150±85	160±87	155±85
平均压强/kPa	29±3	29±3	30±4	29±3	29±4	29±4	28±3
最大接触面积/cm <sup>2</sup>	154.7±7.1	151.1±8.0	152.3±11.4	151.9±9.3	153.7±13.0	148.3±7.1	153.0±8.1

雅等<sup>[6]</sup>研究表明,10名大学生10% BW负重下步行30 min后,右上侧过重的非均匀负重导致斜方肌疲劳和躯干前倾增加,故背包的佩戴时间也会影响躯干的运动状态。另有研究发现,背包行走时躯干活动受限能够有效调节躯干和下肢在矢状面上活动协调,进而改变身体姿势和优化人体行走时的能量吸收<sup>[18]</sup>。由此可见,负重状态下躯干姿势变化能够通过过渡至协调下肢的运动链,最终保持人体稳定。

与双肩包相比,单肩包和手提包限制了躯干左旋,增大了躯干右旋,这与前人研究一致<sup>[5]</sup>,也印证了本文第2个研究假设。背包种类和携带位置的不同会影响身体姿势,单肩包和手提包由于负重的偏侧性会导致人体重心移动程度较大,从而影响身体姿势。已有研究证实,单侧负重增加了老年人行走的不稳定性<sup>[19]</sup>。此外,与双肩包相反,单肩包由于包带的限制会约束同侧手臂的运动,而限制手臂摆动功能将无法抵消行走时异侧下肢产生的角动量,造成躯干的旋转增大来维持运动功能<sup>[20]</sup>。Li等<sup>[21]</sup>研究发现,背负10% BW或以上背包会显著改变躯干和骨盆运动模式,并增加躯干肌肉活动。当由于非对称的负荷导致身体和重物的总质心偏移后,躯干旋转和侧屈运动会导致不同程度的躯干肌群激活,进而产生特定拮抗肌群或收缩肌群的代偿反应,增加了下腰痛的发生概率<sup>[5]</sup>。

### 3.2 下肢运动学特征

在行走中增加躯干负重会增加下肢关节活动,其目的为保持人体行走过程中的平衡和稳定<sup>[7]</sup>。赵功赫等<sup>[22]</sup>研究表明,载荷增加后,人体主要通过调整髋、膝关节角度来适应变化,而踝关节的贡献相对较小。与之不同的是,一项系统评价指出,背包行走时髋关节和踝关节ROM增加<sup>[23]</sup>,本研究结果与该结果一致。在10% BW下踝关节矢状面和额状面ROM显著增大,而膝关节运动学无明显变化,究其原因可能与即刻的楼梯步道行走有关。尽管

上楼梯跨步需要更多膝关节和踝关节的活动参与,但10% BW载荷等级和较短佩戴时间可能无法迫使膝关节产生即刻的屈曲补偿活动<sup>[13]</sup>。Birrell等<sup>[24]</sup>研究发现,24 kg负重行军60 min后人体的肌肉骨骼不适反应集中在髌踝关节,背包佩戴时间也会影响肌肉骨骼系统的生物力学,故后续研究应观察佩戴背包行走一段时间后下肢生物力学特征。此外,单侧负重模式的背包有更大的踝关节ROM和髌关节屈曲角峰值,身体做出相应调整以保证支撑期间的平衡与稳定,这可能与裸足行走测试对本体感觉的影响有关。

### 3.3 足底压力特征

以往研究表明,在负重增加时人体足底压力增加在第1、2、3跖骨处较为明显<sup>[11-12]</sup>。本文结果同样显示,10% BW载荷下第1、3跖骨处压力峰值有显著性升高。在不同行走状态下足底应力分布不同,而在负重行走时负重质量与足底所受压强呈正相关<sup>[25-26]</sup>。由此可见,上楼梯时载荷增加会导致足底最大压力的变化。若足部长期受到较大负荷,则会使足弓产生过大压力使其肌肉发生形变,形成扁平足,进而产生神经和肌肉的疼痛。

此外,不同的背包导致足底不同部位的压力峰值升高。Haselgrove等<sup>[2]</sup>研究表明,人体承受过大载荷后重心位置会发生偏移,从而导致机体不平衡,此时人体会改变姿势来达到新平衡。本文发现,手提包和斜挎单肩包携物方式会产生足弓和足跟内侧压力分布过高的趋势,这与耿海燕<sup>[12]</sup>的研究结果类似。足底各区接触时间指足底各分区分别与地面相互作用的时间,受步速和运动方式的影响。双肩包与单侧负重背包相比,其足底大部分区域接触时间显著减少。推测这种差异可能在当负荷继续增加时,足底各区增加的冲量相较于其他背包方式增加的幅度较小;即双肩包方式积累地面反作用力的效应可能随载荷的增加比较平稳而不会

很剧烈,与其余负重模式相比有可能略微减轻同等载荷对足负荷的吸收。从背包对足负荷方面分析,这有可能是以往研究表明双肩背包方式对身体影响较小的原因之一。对于全足平均压强和足底最大接触面积,5% BW 和 10% BW 载荷未使上述指标产生显著性变化,今后的实验可以继续研究增加载荷后足平均压强的变化阈值。

本研究中未设置背包时间,而其也会影响人体肌肉骨骼的生物力学变化,后续研究还将继续对非对称负重下的身体姿势变化进行分析。

## 4 结论

楼梯行走时,5% BW 和 10% BW 背包载荷会限制躯干的旋转,同时踝关节活动增加,以适应着地期间的步态平衡,在 10% BW 背包载荷下足底第 1、3 跖骨处的压力增加。此外,双肩包引起足趾处压力的升高,而单肩包和手提包体现出增加足弓和足跟内侧压力的趋势。与双肩包相比,单侧负重模式的背包在人体额状面的载荷不对称,从而使身体姿势偏离中立位置,增加了躯干向未负重侧的倾斜和向负重侧的旋转活动,使行走更不稳定;人体增加屈髋和踝关节屈伸幅度以维持行走平衡。因此,本文建议大学生群体选择对称性背包作为携物方式,避免身体姿势的左右偏离。同时,应尽量避免长时间携带重物,容易升高足跖骨区的负荷累积,对足部健康造成影响。

## 参考文献:

[ 1 ] JONES GT, MACFARLANE GJ. Epidemiology of low back pain in children and adolescents [ J ]. Arch Dis Child, 2005, 90(3): 312-316.

[ 2 ] HASELGROVE C, STRAKER L, SMITH A, *et al.* Perceived school bag load, duration of carriage, and method of transport to school are associated with spinal pain in adolescents: An observational study [ J ]. Aust J Physiother, 2008, 54(3): 193-200.

[ 3 ] 朱厚伟, 史曙生, 申翠梅, 等. 背包重量与背包方式对儿童身体姿势的影响[ J ]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(8): 658-668.

[ 4 ] HUANG L, YANG Z, WANG R, *et al.* Physiological and biomechanical effects on the human musculoskeletal system while carrying a suspended-load backpack [ J ]. J Biomech, 2020, 108: 109894.

[ 5 ] 赵功赫, 曲峰. 女性单侧负重步态的躯干和骨盆运动学特征

研究[ J ]. 天津体育学院学报, 2020, 35(4): 439-445.

[ 6 ] 赵美雅, 倪义坤, 田山, 等. 行走过程中不同背包负重方式对人体生理参数的影响[ J ]. 医用生物力学, 2015, 30(1): 8-13.

ZHAO MY, NI YK, TIAN S, *et al.* Effects of different load distribution modes on human physiological parameters during walking [ J ]. J Med Biomech, 2015, 30(1): 8-13.

[ 7 ] 赵功赫, 曲峰, 杨辰, 等. 躯干不同负重方式对人体步行的生物力学影响[ J ]. 体育学刊, 2017, 24(2): 128-134.

[ 8 ] 王敏, 陆阿明, 张秋霞, 等. 背包对青少年平衡、身体姿势及步态影响的研究进展[ J ]. 体育科研, 2015, 27(2): 8-12.

[ 9 ] GOLRIZ S, HEBERT JJ, BO FOREMAN K, *et al.* The effect of shoulder strap width and load placement on shoulder-backpack interface pressure [ J ]. Work, 2017, 58(4): 455-461.

[ 10 ] DOCKRELL S, BLAKE C, SIMMS C. Guidelines for schoolbag carriage: An appraisal of safe load limits for schoolbag weight and duration of carriage [ J ]. Work, 2015, 53(3): 679-688.

[ 11 ] 李壮志, 陈玉娟, 李立, 等. 不同载荷书包对小学生身体姿势及足底压力的影响[ J ]. 中国学校卫生, 2015, 36(2): 174-176.

[ 12 ] 耿海燕. 单、双肩书包负重行走儿童的足底压力测量[ J ]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(33): 6267-6270.

[ 13 ] 唐刚, 魏高峰, 周海, 等. 测量并分析上楼过程中下肢关节角变化[ J ]. 医用生物力学, 2011, 26(5): 460-464.

TANG G, WEI GF, ZHOU H, *et al.* Measurement and analysis of the joint angle in lower limb during stair ascent [ J ]. J Med Biomech, 2011, 26(5): 460-464.

[ 14 ] NADEAU S, MCFADYEN BJ, MALOUIN F. Frontal and sagittal plane analyses of the stair climbing task in healthy adults aged over 40 years: What are the challenges compared to level walking? [ J ]. Clin Biomech, 2003, 18(10): 950-959.

[ 15 ] HEUSCHER Z, GILKEY DP, PEEL JL, *et al.* The association of self-reported backpack use and backpack weight with low back pain among college students [ J ]. J Manipulative Physiol Ther, 2010, 33(6): 432-437.

[ 16 ] LESSI GC, DOS SANTOS AF, BATISTA LF, *et al.* Effects of fatigue on lower limb, pelvis and trunk kinematics and muscle activation: Gender differences [ J ]. J Electromyogr Kinesiol, 2017, 32: 9-14.

[ 17 ] MAJUMDAR D, PAL MS, MAJUMDAR D. Effects of military load carriage on kinematics of gait [ J ]. Ergonomics, 2010, 53(6): 782-791.

[ 18 ] GOUJON-PILLET H, SAPIN E, FODÉ P, *et al.* Three-dimensional motions of trunk and pelvis during transfemoral amputee gait [ J ]. Arch Phys Med Rehabil, 2008, 89(1): 87-94.