

doi:10.3969/j.issn.1005-3697.2024.03.013

❖ 临床研究 ❖

# 成年男性增负荷后的步态及膝关节运动参数特征研究

李楠<sup>1</sup>, 李雪彬<sup>2</sup>, 王欢<sup>1</sup>, 王虎军<sup>1</sup>, 郗淑燕<sup>1</sup>

(首都医科大学, 1. 附属北京康复医院康复诊疗中心; 2. 北京康复医学院, 北京 石景山 100144)

**【摘要】目的:** 研究成年男性增负荷后的步态及膝关节运动参数运动特征, 探讨增负荷行走对膝关节的影响。**方法:** 选择 82 名健康男性大学生为研究对象, 按照增负荷程度不同将对象分为 0% BW 组和 15% BW 组, 每组各 41 名。0% BW 组以自身体重的 0% 负荷行走; 15% BW 组以自身体重的 15% 负荷行走。使用 Vicon Nexus 1.5.2 三维光学运动捕捉系统 (英国 OML) 采集不同负荷前后步态参数和膝关节运动学数据, 包括步长、步宽、步频、支撑相占比、摆动相占比、膝关节支撑相角度和摆动相角度最大值及最小值、力矩最大值、力矩最小值, 对得到的数据进行比较。**结果:** 15% BW 组步频和摆动相均高于 0% BW 组, 支撑相低于 0% BW 组 ( $P < 0.05$ ); 矢状面角度最大值 (屈膝最大角度) 和最大力矩均大于 0% BW 组 ( $P < 0.05$ ); 矢状面角度最小值 (屈膝最小角度) 和最小力矩均少于 0% BW 组 ( $P < 0.05$ ); 两组研究对象步长和步宽比较, 差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。**结论:** 在增负荷状态下, 人体会增大膝关节力矩及膝关节屈曲角度, 增大支撑相占比, 胫骨平台应力峰值增大, 长期负重行走可能会诱发膝关节相关疾病。

**【关键词】** 步态; 膝关节运动学; 膝关节炎; 异常负荷

**【中图分类号】** R493 **【文献标志码】** A

## Characteristics of gait and knee joint motion parameters in adult men after load increase

LI Nan<sup>1</sup>, LI Xue-bin<sup>2</sup>, WANG Huan<sup>1</sup>, WANG Hu-jun<sup>1</sup>, QIE Shu-yan<sup>1</sup>

(1. Rehabilitation Diagnosis and Treatment Center, Beijing Rehabilitation Hospital Affiliated to Capital Medical University; 2. Beijing Rehabilitation Medicine College, Capital Medical University, Beijing 100144, China)

**【Abstract】Objective:** To study the motion characteristics of gait and knee joint motion parameters in adult males after increasing load, and to explore the impact of increasing load walking on knee joint. **Methods:** A total of 82 healthy male college students were randomly divided into 0% BW group and 15% BW group according to different levels of load increase, with 41 cases in each group, and walking at 0% and 15% of their body weight, respectively. The Vicon Nexus 1.5.2 three-dimensional optical motion capture system (OML) was used to collect gait parameters and knee joint kinematic data before and after different loads, including stride length, stride width, stride frequency, support phase proportion, swing phase proportion, maximum and minimum knee joint support phase angle Paired tests were conducted on the obtained data to compare the differences between the maximum and minimum values of knee joint swing phase angles, maximum and minimum torque values. **Results:** The step frequency and swing phase of the 15% BW group were higher than those of the 0% BW group, while the support phase was lower than that of the 0% BW group ( $P < 0.05$ ). The maximum sagittal angle (maximum knee flexion angle) and maximum torque were greater than those of the 0% BW group ( $P < 0.05$ ), the minimum sagittal angle (minimum knee flexion angle) and minimum torque were less than those of the 0% BW group ( $P < 0.05$ ). The comparison of step length and step width between the two groups had no statistical significance ( $P > 0.05$ ). **Conclusion:** In the condition of load increase, the human body will increase the knee torque and knee flexion Angle, increase the proportion of support phase, and increase the peak stress of tibial plateau. Long-term weight-bearing walking may induce knee joint related diseases.

**【Key words】** Gait; Knee joint kinematics; Knee arthritis; Abnormal load

增负荷行走是日常生活中常见的出行方式, 如背包、提重物等, 但这种外加负荷作用于人体, 会改变身体和重物总质心的位置, 会改变正常的步态<sup>[1]</sup>。为了维持身体的平衡, 人体会相应的调整步

态和身体姿势。不同的负重方式, 不同的负荷对人体姿势会产生不同影响, 也会产生不同的姿势适应<sup>[2-3]</sup>, 从而影响骨骼肌肉系统, 导致疼痛和关节病变。其中, 膝关节就是疼痛高发部位之一<sup>[4-7]</sup>。步

基金项目: 首都卫生发展科研专项 (2020 - 22251)

作者简介: 李楠 (1986 -), 女, 硕士, 主管技师。E-mail: kflinan1986@126.com

通讯作者: 郗淑燕, 博士。E-mail: shuyanpb@mail.ccmu.edu.cn

行过程中需要依靠膝关节来实现力的传导,使地面的反作用力顺利传导到骨盆和躯干,因此有着很高的运动频率。20 世纪 90 年代后期以来,我国膝关节疼痛患者与日俱增,膝关节炎发病率为 8%,病例数高达 8 000 万,更是出现了年轻化趋势。膝关节的屈伸运动,对人体步行的协调和稳定起着重要作用。以往研究<sup>[8]</sup>表明,随着屈膝角度的增大,半月板,股骨软骨的应力峰值呈相对增大趋势,这些证据表明膝关节产生的应力集中及接触面积的改变是影响膝关节整体失衡的主要原因。还有研究<sup>[9]</sup>发现,骨关节炎患者步行时的步态和膝关节运动学特征和健康人有明显区别,如膝骨关节炎患者支撑相屈膝角度明显较大。但是对于负重期间膝关节产生了怎样的姿势适应还存在分歧,是否和关节炎患者行走时有类似的运动特征还有待研究。因此,仍需要大量实验来证明负重对膝关节运动特征的改变,进而避免损伤,减少关节疾病和关节炎的潜在风险。

因男女膝关节周围肌群肌力不同、关节囊及韧带松弛度不同,若男女均纳入,可能会对结果产生干扰。在负重频率、时间和程度方面,成年男性较女性有更大几率从事各种负重活动故女性绝经后膝关节受雌激素水平影响较大,所以本研究只对男性进行观察,分析价值更大。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

选取 2022 年 6 月至 2023 年 4 月就读于首都医科大学附属北京康复医院的 82 名男性大学生为研究对象。纳入标准:(1)身体健康;(2)无骨骼和神经系统疾病;(3)体质量指数(BMI)为(21.42 ± 1.67);(4)实验前 24 h 内未从事剧烈活动;(5)下肢及足部半年内无明显损伤。排除标准:有明显疾病史和损伤史者。两组受试者的年龄、体重、身高比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )。本研究符合《赫尔辛基宣言》要求。

### 1.2 方法

1.2.1 实验仪器 受试者步态参数通过 Vicon Nexus 1.5.2 三维光学运动捕捉系统(英国 OML)联合全方位远红外摄像机组、多个 Marker(标记点)和测力板进行采集,使用数据转换器以及分析软件进行数据的处理和分析。为方便数据采集,受试者需穿紧身短裤,按照 Plug-in gait 步态模型标记 Marker;为防止或减小误差,由一位经专业培训、经验丰富的研究人员进行位置标记;为采集数据的平均性,进行步态数据采集之前,受试者需先进行自然、舒适行走以适应场地。

1.2.2 数据采集 实验中,在受试者左右侧下肢各加贴 8 个白色塑料半球标志点(直径 35 mm),分别位于髌前上棘、髌后上棘、膝关节外侧中点、外踝、小腿外侧中点、大腿外侧中点、跟腱及第二趾骨,其中跟腱和第二趾骨的标志点处于同一水平面。受试者听到指令后开始行走,在进入图像采集区域前至少完成两步行走,离开图像采集区域后继续行走两步以上,保证受试者在图像采集区域为正常行走过程中的步态,而非起步或停止。0% BW 组受试者进行正常状态下的步行;15% BW 组受试者先进行正常状态下的步行,然后在其背部增加其体重的 15% 的负重。在实验开始之前,要求受试者在步道上行走几次以熟悉环境。实验中,要求受试者对每种载荷情况至少完成 3 次,每次行走间歇 1 min,疲劳因素未在实验中考考虑。

### 1.3 统计学分析

运用 SPSS 20.0 软件进行数据处理与分析。正态分布的计量资料以( $\bar{x} \pm s$ )描述,组间比较行独立样本  $t$  检验。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 不同负荷重量行走时时空参数比较

两组负荷重量行走时的步长和步宽均无统计学差异( $P > 0.05$ )。两组步频、支撑相及摆动相比较,15% BW 组步频和摆动相高于 0% BW 组,支撑相低于 0% BW 组( $P < 0.05$ )。见表 1。

表 1 不同负荷重量行走时右侧步态时空参数比较( $\bar{x} \pm s$ )

组别	步长(m)	步宽(m)	步频(step/s)	摆动相(%)	支撑相(%)
0% BW 组(n=41)	0.67 ± 0.04	0.15 ± 0.02	116.09 ± 4.28	59.60 ± 2.95	40.40 ± 2.95
15% BW 组(n=41)	0.65 ± 0.04	0.16 ± 0.03	120.54 ± 6.10	63.93 ± 2.69	36.20 ± 2.62
$t$ 值	1.350	-0.290	-3.468	4.689	-4.388
$P$ 值	0.198	0.776	0.004	<0.001	<0.001

### 2.2 不同负荷重量行走时运动学、动力学参数比较

不同负荷重量行走时运动学、动力学参数比较,负荷重量为 15% BW 时,矢状面角度最大值(屈膝最大角度)和最大力矩均增大( $P < 0.05$ );矢状面角度最小值(屈膝最小角度)和最小力矩均减少( $P < 0.05$ )。见表 2。

表 2 不同负荷重量行走时右侧膝关节动力学参数( $\bar{x} \pm s$ )

组别	角度最大值(°)	角度最小值(°)	力矩最大值(Nm/kg)	力矩最小值(Nm/kg)
0% BW 组(n=41)	58.23 ± 3.02	-3.00 ± 1.20	4.96 ± 0.78	-2.63 ± 0.79
15% BW 组(n=41)	61.15 ± 2.53	-4.41 ± 1.23	5.72 ± 0.79	-3.30 ± 1.07
$t$ 值	-3.548	8.385	-3.944	3.849
$P$ 值	0.003	<0.001	0.001	0.002

## 3 讨论

人们在行走过程中要保持平衡,但是因为质心的

不同会使得固有的不稳定性增强,保持平衡也会相对困难<sup>[10]</sup>。成年男性增负荷后,人体的总质心的位置发生改变,随着背部负重的不断增加,更是增加了地面对于足底的冲击力和维持平衡的难度。人体为了保持平衡,步态和膝关节会在中枢神经的控制下,做出一系列调整,通过分析这些调整,我们可以推断出人体的补偿机制和负重行走造成膝关节损伤的原因。

本研究中,15% BW 负荷下行走的步频发生明显改变,这表明在负重状态下,人体很难保持固有频率,这将增加身体的能量消耗。这一结果和关于负重步态的研究<sup>[11]</sup>结果基本一致。步频的变化主要是为了增加行走的稳定性。因总质量发生变化,下肢需要更大的工作能力来带动身体运动,身体的稳定性也会因为人体增负荷而降低。而摆动腿在摆动过程中无法起到支撑作用,为了减轻支撑腿的负担,摆动腿会更快的着地进入初始着地期,从而导致了步频变长,这与文献<sup>[12]</sup>的结果基本一致。

增负荷后,支撑相和摆动相所占的百分比随着负荷的增加发生变化,前者增大,后者随着负荷的增加而减小,与文献<sup>[13-14]</sup>的结果一致。这是因为摆动期的稳定性不如支撑期,负荷增加后造成原有平衡被打破,人体为了维持稳定性,自然会选择更多的支撑相。

在本研究中,15% BW 负重时膝关节最大角度相比0% BW 负重时增大,这与文献<sup>[15]</sup>结果一致,说明膝关节在增负荷后为了使重心不受过大影响会通过关节角度的改变来维持行走过程中的平衡功能。膝关节屈曲的第一个峰值是支撑相的承重反应期,膝关节的屈曲会随着负荷的增加而增大。这是由于在初始着地期,脚跟和地面接触后必然会产生更大的地返力。这种冲击力如果不能进行有效的缓解,不仅会对关节造成伤害,也有可能沿肢体上传对大脑造成冲击,所以在支撑中期,膝关节会通过更加屈曲来缓解冲击。不仅是膝关节,髌关节和踝关节在负重状态下也会有相应的运动学改变。

屈膝角度增大时,半月板、股骨软骨和胫骨软骨上的 Mises 应力峰值及 Tresca 应力峰值呈相对增大趋势<sup>[16]</sup>,这将导致关节内部负载平衡打破造成关节软骨退变风险增加,促使膝骨关节炎病变加剧。与此同时,有研究<sup>[17]</sup>表明,步态在屈膝时异常关节负荷会加速骨关节软骨的退变从而引发不可逆损伤。这说明负荷增大不仅改变膝关节的最大屈曲角度,增大了膝关节的应力峰值,还会增加膝关节的关节负荷造成损伤。

对比膝骨关节炎患者步态中的膝关节运动学变

化发现,膝骨关节炎患者在支撑相时的膝关节运动学改变和人体增负荷状态下的膝关节运动学改变相同,都是在足跟着地后矢状面角度有明显增大<sup>[18-19]</sup>。因此,负荷状态下步行会通过改变关节角度和关节负荷诱发膝关节炎的产生。

矢状面膝关节的力矩反映了支撑阶段推进身体前进和摆动阶段抬腿和向前迈腿的能力。外部的力量要使膝关节屈曲时,膝关节的内部会产生一个相对较大的伸膝力量进行抵抗,与关节的运动方向相反,膝关节周围的伸膝肌肉吸收能量做负功,膝关节的最大伸膝力矩便会随之增大,膝关节的负功也就随之增大。研究<sup>[8]</sup>认为步行过程中,负荷的增加与股四头肌拉力负荷成正比,同时会造成膝关节力矩也随之增大,随着负荷的增大髌腱的张力也会增加,髌骨关节的压力也增加。研究<sup>[20]</sup>显示,髌骨关节的压力每减少 1 MPa,膝关节痛就会减少 56%。

综上,成年男性增负荷后步态特征产生改变。负重后平均步频增大,支撑相占比增大,摆动相占比减小。为了减少增负荷后对膝关节的损伤,在支撑中期,膝关节会采取增大屈曲角度来吸收冲击。但增大屈曲角度会增大膝关节的力矩和应力峰值。负重又会导致关节异常负荷,加重膝关节炎的发病率。因此,从临床康复角度看,膝关节炎患者不提倡增负荷行走。

#### 参考文献

- [1] 赵功赫,曲峰. 女性不对称负重行走下肢关节适应机制研究[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(6): 793-800, 804.
- [2] Lin G, Zhao X, Wang W, et al. The relationship between forward head posture, postural control and gait: a systematic review[J]. Gait & Posture, 2022, 98: 316-329.
- [3] Diebo BG, Shah NV, Boachie-Adjei O, et al. Adult spinal deformity[J]. Lancet (London, England), 2019, 394(10193): 160-172.
- [4] Huang XM, Yuan FZ, Chen YR, et al. Physical therapy and orthopaedic equipment-induced reduction in the biomechanical risk factors related to knee osteoarthritis: a systematic review and Bayesian network meta-analysis of randomised controlled trials[J]. BMJ Open, 2022, 12(2): e051608.
- [5] Rynne R, Le Tong G, Cheung RTH, et al. Effectiveness of gait retraining interventions in individuals with hip or knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis[J]. Gait & Posture, 2022, 95: 164-175.
- [6] Constantino de Campos G, Mundi R, Whittington C, et al. Osteoarthritis, mobility-related comorbidities and mortality: an overview of meta-analyses[J]. Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease, 2020, 12: 1759720X20981219.

(下转第 362 页)