

文章编号: 1004-7220(2022)04-0754-05

# 士兵负重单脚落地时膝关节生物力学特征以及 与等速肌力的关系

徐盛嘉, 赵寒治

(中国人民解放军陆军工程大学 军事基础系, 南京 211101)

**摘要:**目的 分析士兵负重单脚落地对膝关节产生的影响,并探讨与肌力的关系,为日常负重训练提供依据。  
方法 采用 Vicon 动作捕捉系统和 AMTI 测力台分别采集 12 名士兵学员不负重和负重 15 kg 从 30 cm 高度单脚落地时膝关节的运动学和动力学数据,同步采集大腿前后侧肌群表面肌电(surface electromyography, sEMG),并进行膝关节屈伸等速肌力测试。  
结果 与无负重相比,负重 15 kg 落地时膝关节屈曲角度和胫骨反作用力显著增加( $P<0.05$ ),股直肌、股内外侧肌和股二头肌 sEMG 最大值均显著增加( $P<0.05$ ),其余指标负重前后无显著差异( $P>0.05$ )。伸膝峰值力矩与无负重单脚落地垂直地面反作用力呈显著负相关( $P<0.05$ ),其余指标无显著相关关系( $P>0.05$ )。  
结论 负重 15 kg 单脚落地增加了膝关节屈曲角度和胫骨反作用力,大腿前后侧肌群的激活可缓解落地时的地面反作用力,肌力对于预防落地损伤具有一定作用。

**关键词:** 负重; 单脚落地; 膝关节; 生物力学; 等速肌力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.027

## Biomechanical Characteristics of the Knee Joint During Single-Leg Landing of Soldiers and its Relationship with Isokinetic Muscle Strength

XU Shengjia, ZHAO Hanzhi

(Department of Military Foundation, Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101, China)

**Abstract: Objective** To analyze the impact of soldiers' single-leg landing with load carriage on knee joint, and investigate its relationship with muscle strength, so as to provide references for daily load carriage training.

**Methods** A total of 12 soldiers were required to perform single-leg landing from the 30 cm height without load carriage and with 15 kg load carriage, respectively. The kinematic and kinetic parameters were collected using Vicon motion capture system and AMTI force platform. The surface electromyography (sEMG) of anterior and posterior thigh muscles were also collected simultaneously, and the isokinetic strength during knee flexion and extension was tested. **Results** Compared with landing without load carriage, knee flexion angle and joint reaction force significantly increased during landing with 15 kg load carriage ( $P<0.05$ ). The maximum sEMG of rectus femoris, lateral and medial femoral, biceps femoris increased significantly ( $P<0.05$ ), but there were no significant differences in other indexes without and with load carriage ( $P>0.05$ ). There was a significant negative correlation between peak moment of knee extension and vertical ground reaction force during single-leg landing without load carriage ( $P<0.05$ ), while other indexes had no significant correlations ( $P>0.05$ ). **Conclusions** Knee flexion

收稿日期: 2021-08-07; 修回日期: 2021-11-09

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20211228), 陆军工程大学军事理论创新课题(LLCX201903-28), 陆军工程大学教育教学研究课题(GJ1911092)

通信作者: 徐盛嘉, 讲师, E-mail: xushengjia510@126.com

angle and joint reaction force significantly increase during single-leg landing with 15 kg load carriage, the activation of anterior and posterior thigh muscles can relieved the ground reaction force during landing, and muscle strength plays some role in preventing landing injury.

**Key words:** load carriage; single-leg landing; knee joint; biomechanics; isokinetic strength

在执行军事任务时,士兵通常需要携带大量的物资装备,以保障和维持士兵在不确定或敌对的环境中执行军事任务<sup>[1]</sup>。然而,负重也会给士兵骨骼肌肉系统带来额外的压力。研究发现,士兵负重时身体的生物力学特征会发生改变,表现为躯干前倾,下肢左右膝、踝关节负荷增加,左右髋关节屈曲峰值角度、左右髋关节外旋峰值角度、左右膝关节内翻峰值角度也会受到较为明显的影响,可增加潜在损伤的风险<sup>[2]</sup>。

调查发现,膝关节是士兵最常见的损伤部位之一<sup>[3]</sup>。从高处跳下是士兵军事训练与执行任务中常见的动作之一。例如,跳下车辆、壕沟以及翻越高墙或其他障碍物后并继续跑进。为更好地与落地后的跑进衔接,士兵通常采用单脚落地的方式。但与双脚落地相比,单脚落地对膝关节产生的负荷更大,生物力学特征也存在差异<sup>[4]</sup>。

落地需要来自股四头肌、髋关节伸肌和踝关节跖屈肌的离心力控制关节屈曲并使身体减速。在动态、功能性运动过程中,控制和充分吸收高冲击力对于预防损伤尤为重要<sup>[5]</sup>。目前,针对落地的生物力学研究已广泛开展,包括从不同高度落地<sup>[6]</sup>、疲劳后落地<sup>[7]</sup>、执行认知任务时落地<sup>[8]</sup>或落地时双腿之间的差异<sup>[9]</sup>,但负重单脚落地时膝关节的生物力学特征变化以及肌力在其中所起的作用尚不清楚。本文对比同一高度无负重与负重 15 kg 单脚落地的运动学和动力学指标差异,并通过膝关节等速肌力测试,分析膝关节屈伸力矩与单脚落地生物力学特征的关系。研究结果有助于了解单脚落地对下肢骨骼肌肉的潜在影响,为士兵负重训练和预防损伤提供依据。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

选取某陆军院校 12 名士兵学员为研究对象 [年龄(22.57±1.84)岁;身高(176.15±5.83)cm;体重(68.35±7.35)kg],无吸烟史和酗酒史,无下

肢严重损伤史,有规律参加锻炼(每周锻炼不少于 3 次),排除超重或偏瘦的学员。排除标准为身体质量指数(body mass index, BMI)小于 18.5 kg/m<sup>2</sup> 或超过 24.0 kg/m<sup>2</sup>。

### 1.2 测试方案

研究采用随机交互的设计,受试人员需进行单脚落地测试和膝关节屈伸肌力测试。测试前 24 h 内不允许进行剧烈运动。负重采用 15 kg 轻装:手持模拟枪,戴凯夫拉头盔,背双肩包,穿迷彩鞋。统一采用优势脚(踢球脚)落地,受试人员双脚站在 30 cm 跳箱上,伸出优势脚,跳箱前悬挂同一高度的标志物。引导受试人员将优势脚置于标志物处,当听到下落口令后,单脚自由落于测力台上并继续前进。

测试时受试人员穿紧身衣裤,事先将 36 个反光标志球贴于图 1 所示身体各部位。表面肌电(surface electromyography, sEMG)传感器按照方案分别放置于股直肌、股外侧肌、股内侧肌、腓肠肌内侧肌腹位置。运动学数据通过 8 台 500 万像素高速红外摄像头和动作捕捉与分析系统(Vicon 公司,英国)采集,频率为 200 Hz;动力学数据通过 1 块三维测力台(AMTI 公司,美国)采集,频率为 1 kHz;采用 16 通道无线遥测表面肌电系统(Noraxon 公司,美国)同步采集 sEMG 信号,频率为 2 kHz,电极位置参照系统提示,分别贴于上述肌群肌腹位置。采集 3 次成功完成的数据,每次测试之间保证充分休息。

膝关节屈伸肌力测试在单脚落地测试 48 h 后进行,使用多关节等速测试系统(Biodex 公司,美国),测试速度为 60°/s,做 5 组最大力量屈伸运动。在正式测试前,先进行 3 次亚极量屈伸练习作为热身。

### 1.3 测试指标

运动学指标包括单脚落地时膝关节屈伸角度和内外翻角度。动力学指标包括单脚落地时膝关节屈伸力矩、内外翻力矩、胫骨近端前向剪切力、胫骨反作用力和垂直地面反作用力。以上指标均取最大值,屈为正值,伸为负值;内翻为正值,外翻为

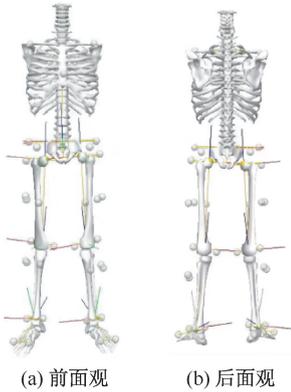


图1 反光标志球位置

Fig.1 Locations of reflective markers (a) Front view, (b) Back view

负值。sEMG 指标包括落地时股直肌、股外侧肌、股内侧肌和股二头肌的 sEMG 最大值。等速肌力指标为屈伸峰值力矩。

#### 1.4 数据处理

在 Vicon Nexus 2.9.0 软件中进行命名、补点及剪切处理。首先,所有标记点在软件中分别命名为前额(HEAD)、胸骨柄(STRN)、左右肩峰(LACR、RACR)、左右髂嵴(LLICST、RLICST)、左右髂前上棘(LASI、RASI)、左右大转子(LTROC、RTROC)、左右股骨内外侧髁(LLFC、LMFC、RLFC、RMFC)、左右内外踝(LLMAL、LMMAL、RMMAL、RLMAL)、左右足跟(LCAL、RCAL)、左右第1跖骨(LMT1、RMT1)、左右第5跖骨(LMT5、RMT5)、左右大腿各3个跟踪点(LTH1、LTH2、LTH3、RTH1、RTH2、RTH3)、左右小腿各3个跟踪点(LTB1、LTB2、LTB3、RTB1、RTB2、RTB3);其次,对采集过程中丢失点的位移轨迹数据进行补点处理,可通过该点的前后轨迹数据或其他标志点的数据轨迹计算获取;最后,截取从跳箱位置到落地后继续前进的过程影像,将包含运动学和动力学数据的 C3D 格式文件导入 Visual 3D 5.02.3 软件中,并建立符合受试者生理学参数的人体骨骼模型,通过逆向动力学算法获得膝关节动力学数据。原始 sEMG 信号在 Noraxon MR 33.16.20 分析软件中经过带通滤波(低频 20 Hz,高频 400 Hz)、全波整流、平滑过滤(RMS 算法,100 ms)处理,并通过落地时 sEMG 的最大值进行幅度归一化。运用 SPSS 22.0 统计软件进行数据处理,正态分布检验后对数据进行配对样本 *t* 检验,相关性分析采用 Pearson 双侧检验,显著水平定义为  $P < 0.05$ 。

## 2 研究结果

不同负重下单脚落地时生物力学特征变化见表1。与无负重相比,负重 15 kg 落地时膝关节最大屈曲角度和胫骨反作用力显著增加( $P < 0.05$ ),其余指标均略有增加,但无显著差异( $P > 0.05$ )。

表1 不同负重下单脚落地运动学和动力学参数差异

Tab.1 Differences of kinematics and dynamics parameters during single-leg landing with different load carriage

参数	无负重	15 kg 负重
屈伸角度/ $^{\circ}$	34.9 $\pm$ 9.4	38.4 $\pm$ 10.3*
内外翻角度/ $^{\circ}$	1.2 $\pm$ 4.9	2.7 $\pm$ 9.0
屈伸力矩/( $N \cdot m \cdot kg^{-1}$ )	-0.3 $\pm$ 0.3	-0.6 $\pm$ 0.7
内外翻力矩( $N \cdot m \cdot kg^{-1}$ )	-2.4 $\pm$ 0.8	-2.7 $\pm$ 1.0
胫骨近端前向剪切力/( $N \cdot kg^{-1}$ )	1.6 $\pm$ 0.8	1.9 $\pm$ 0.9
胫骨反作用力( $N \cdot kg^{-1}$ )	-22.2 $\pm$ 4.6	-24.0 $\pm$ 3.4*
垂直地面反作用力( $N \cdot kg^{-1}$ )	35.1 $\pm$ 8.7	35.6 $\pm$ 7.1

注: $n = 12$ ,无负重相比,\* $P < 0.05$ 。

不同负重下 sEMG 指标变化如图2所示。与无负重相比,负重 15 kg 落地时股直肌、股内侧肌、股外侧肌和股二头肌最大 sEMG 均显著增加( $P < 0.05$ )。

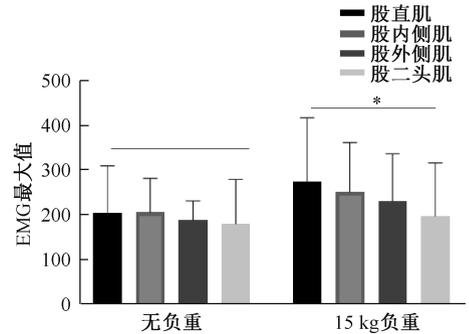


图2 不同负重下单脚落地时 sEMG 信号差异

Fig.2 Differences of surface electromyography during single-leg landing with different load carriage

单脚落地时生物力学特征与等速肌力之间的关系见表2。伸膝峰值力矩与无负重单脚落地的垂直地面反作用力呈显著负相关( $P < 0.05$ ),其余指标之间无显著相关关系( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

士兵负重单脚落地时膝关节的生物力学特征变化对日常训练和损伤预防有多方面的影响。负重可能会改变动作的运动学和动力学特征,增加肌

表2 不同负重情况下单脚落地时膝关节生物力学参数与等速肌力相关关系

Tab. 2 Relationship between biomechanical parameters of knee joint and isokinetic muscle strength during single-leg landing with different load carriage

参数	无负重				15 kg 负重			
	伸膝峰值力矩		屈膝峰值力矩		伸膝峰值力矩		屈膝峰值力矩	
	Pearson 系数	P						
屈/伸角度	-0.11	0.75	-0.16	0.64	0.02	0.96	-0.29	0.39
内翻/外翻角度	-0.25	0.45	-0.29	0.38	-0.43	0.18	-0.04	0.99
屈/伸力矩	-0.25	0.45	0.09	0.80	-0.05	0.88	-0.26	0.44
内翻/外翻力矩	-0.19	0.58	-0.37	0.26	-0.19	0.57	-0.11	0.74
胫骨近端前向剪切力	0.35	0.29	-0.31	0.35	0.60	0.86	-0.07	0.85
胫骨反作用力	-0.50	0.12	-0.27	0.43	-0.30	0.37	-0.32	0.32
垂直地面反作用力	-0.63 *	0.03	0.12	0.73	-0.47	0.14	-0.34	0.31

注:  $n=12$ , 无负重相比,  $*P<0.05$ 。

肉骨骼损伤的风险。本研究结果显示,负重 15 kg 增加了单脚落地时膝关节的最大屈曲角度和胫骨反作用力,而膝关节屈曲和外翻峰值力矩、胫骨近端前向剪切力以及垂直地面反作用力均无显著变化。

增加膝关节屈曲角度可能是一种降低负重落地时前交叉韧带损伤风险的预防策略。Sell 等<sup>[10]</sup>研究表明,与不负重落地相比,穿着防弹衣、佩戴头盔和手持步枪双脚落地时[负重(15.0±3.7) kg],膝关节最大屈曲角度显著增加。本研究发现,以类似的负重量单脚落地时,膝关节屈曲角度同样显著增加。研究表明,膝关节屈曲角度的增加与降低垂直地面反作用力密切相关<sup>[5]</sup>。本研究结果显示,地面反作用力并未在负重后显著增加。然而,根据地面反作用力逆向推导计算出的胫骨反作用力却显著增加,推测原因与膝关节屈曲角度增加有一定关系。

Kaplan 等<sup>[11]</sup>研究表明,在中等和大负重量双脚落地情况下,膝关节屈曲峰值力矩分别显著增加了 7% 和 12%。垂直地面反作用力也可引起膝关节伸展力矩的增加,向前的剪切力也会随之增大<sup>[12]</sup>。为了平衡和控制膝关节屈曲力矩,股四头肌被激活并增加了膝关节伸展力矩,该力矩可通过在胫骨近端产生前向剪切力,同时也增加了前交叉韧带的张力<sup>[13]</sup>。在单脚落地过程中有更大胫骨近端前向剪切力的个体受伤风险也较高,即使其落地时的垂直地面反作用力较小<sup>[14]</sup>。然而,本研究并未发现负重 15 kg 单脚落地关节力矩与胫骨近端前向剪切力显著增加,可能与负重量较轻和落地高度较低有关。

落地时膝关节外翻被认为是非接触性前交叉韧带损伤的危险因素之一。负重也可能增加膝关

节的外翻角度,这会在膝关节存在前向剪切力情况下进一步增加前交叉韧带损伤的风险<sup>[15]</sup>。由于参与本实验的受试者具有一定训练经历和落地技术,故在负重 15 kg 落地时膝关节内翻力矩增加,使外翻角度的变化控制在一定范围内。

为应对负重造成的剪切力和反作用力增加,骨骼肌必须参与以减少膝关节软组织上的负荷。在膝关节屈曲期间,膝关节伸肌离心收缩使身体减速进行缓冲,可吸收从地面传递的能量<sup>[16]</sup>。本文结果显示,落地后 sEMG 信号出现峰值,表明大腿肌群被激活,通过肌肉活动减缓身体向下的加速运动,进而降低落地负荷。负重后肌肉激活程度进一步增加,缓解了负重带来的生物力学特征改变。此外,对于膝关节,需要依靠腓绳肌与股四头肌共同激活以维持膝关节的动态平衡,从而降低膝关节韧带所受的负荷及损伤风险。股四头肌激活水平超过腓绳肌过多,则会显著增大向前的剪切力<sup>[17]</sup>。本研究发现,负重落地时股二头肌的激活程度显著增加,降低了负重引起的屈伸肌群激活程度之间的差异。

神经肌肉系统可通过髌、膝、踝关节肌肉组织的离心收缩主动吸收落地时的冲击力,降低关节周围被动组织的负荷。膝关节周围肌群在落地时能量吸收方面发挥关键作用<sup>[18]</sup>。负重增加意味着需要更大的下肢力量才能安全落地<sup>[16]</sup>。同时,随着负重增加,垂直地面反作用力诱发了膝关节屈曲力矩,必须通过股四头肌离心收缩平衡该力矩,以防止膝关节过度屈曲可能引发的摔倒<sup>[19]</sup>。因此,腿部力量对士兵在负重状态下安全落地具有重要作用。然而,Uhorchak 等<sup>[20]</sup>研究认为,股四头肌肌力、腓绳

肌肌力以及股四头肌肌力和腓绳肌肌力的比值并不是预测非接触性膝关节损伤的指标。Bennett等<sup>[21]</sup>研究也表明,股四头肌力、腓绳肌力及其肌力比与跳下落地动作中的胫骨前向剪切力并无关联。本研究结果证实了上述结论,仅在不负重落地时股四头肌肌力与垂直地面反作用力显著相关。

本研究具有一定的局限性。例如:没有采集肌肉最大自主收缩数据,sEMG的幅度归一化处理可能并不准确。此外,效应量检验发现样本量偏少。

### 3 结论

负重 15 kg 单脚落地增加了膝关节屈曲角度和胫骨反作用力,大腿前后侧肌群的激活可缓解落地时的地面反作用力,增加腿部肌力对于预防单脚落地时膝关节的损伤具有一定作用。

### 参考文献:

- [ 1 ] 徐盛嘉,黄强年,赵凤雏.士兵职业负重损伤研究[J].湖北体育科技,2018,37(8):704-707.
- [ 2 ] 王增刚,王金之,冯茹,等.负重对行军士兵下肢步态特征的影响[J].医用生物力学,2018,33(4):360-364.  
WANG ZG, WANG JZ, FENG R, *et al.* Influence of load carriage during military walking on lower limb gait characteristics [J]. J Med Biomech, 2018, 33(4): 360-364.
- [ 3 ] 徐盛嘉,王巍,田东,等.负重对军人的不利影响和对策研究[J].军事体育学报,2018,37(2):1-4.
- [ 4 ] TAYLOR JB, FORD KR, NGUYEN AD, *et al.* Biomechanical comparison of single- and double-leg jump landings in the sagittal and frontal plane [J]. Orthop J Sports Med, 2016, 4(6): 29-35.
- [ 5 ] STEEVE S. An investigation of the relationship between impact force attenuation in landing and isokinetic strength of knee muscles in individuals with different training backgrounds [D]. Knoxville: University of Tennessee, 2008.
- [ 6 ] 李旭鸿,范年春,韩斌,等.落地高度和性别对单脚落地下肢关节矢状面内运动学、动力学和能量耗散的影响[J].中国运动医学杂志,2016,35(4):327-332.
- [ 7 ] 夏锐,张希妮,傅维杰.两种疲劳方案对落地时下肢运动学和冲击力时频特征的影响[J].医用生物力学,2017,32(5):427-435.  
XIA R, ZHANG XN, FU WJ. Effects of two fatigue protocols on lower extremity kinematics and time/frequency-domain characteristics of impact forces during drop landing [J]. J Med Biomech, 2017, 32(5): 427-435.
- [ 8 ] KAJIWARA M, KANAMORI A, KADONE H, *et al.* Knee biomechanics changes under dual task during single-leg drop landing [J]. J Exp Orthop, 2019, 6(1): 5-10.
- [ 9 ] 刘海瑞,傅维杰,伍颢,等.单腿落地时优势腿与非优势腿

- 的生物力学偏侧性研究[J].体育科学,2014,34(8):70-76.
- [10] SELL TC, CHU Y, ABT JP, *et al.* Minimal additional weight of combat equipment alters air assault soldiers' landing biomechanics [J]. Mil Med, 2010, 175(1): 41-47.
  - [11] KAPLAN JT, RAMSAY JW, CAMERON SE, *et al.* Association between knee anatomic metrics and biomechanics for male soldiers landing with load [J]. Am J Sports Med, 2020, 48(6): 1389-1397.
  - [12] SELL TC, FERRIS CM, ABT JP, *et al.* Predictors of proximal tibia anterior shear force during a vertical stop-jump [J]. J Orthop Res, 2007, 25(12): 1589-1597.
  - [13] CHAPPELL JD, CREIGHTON RA, GIULIANI C, *et al.* Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: Risks for noncontact anterior cruciate ligament injury [J]. Am J Sports Med, 2007, 35(2): 235-241.
  - [14] 王海妹,谢地,马旭,等.踝关节贴扎在优势侧落地动作中对膝关节生物力学特性的影响[J].医用生物力学,2020,35(6):679-684.  
WANG HM, XIE D, MA X, *et al.* Effects of ankle taping on knee biomechanics during dominant-legged drop landing [J]. J Med Biomech, 2020, 35(6): 679-684.
  - [15] MANIAR N, SCHACHE AG, PIZZOLATO C, *et al.* Muscle contributions to tibiofemoral shear forces and valgus and rotational joint moments during single leg drop landing [J]. Scand J Med Sci Sports, 2020, 30(9): 1664-1674.
  - [16] BROWN TN, O'DONOVAN M, HASSELQUIST L, *et al.* Lower limb flexion posture relates to energy absorption during drop landings with soldier-relevant body borne loads [J]. Appl Ergon, 2016, 52(6): 54-61.
  - [17] 周志鹏.神经肌肉功能与前交叉韧带损伤生物力学危险因素的相关性研究[D].北京:北京体育大学,2018.
  - [18] DECKER MJ, TORRY MR, WYLAND DJ, *et al.* Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing[J]. Clin Biomech, 2003, 18(7): 662-669.
  - [19] 王熙,杨洋,孙晓乐,等.神经肌肉疲劳前后运动鞋对下肢落地冲击的生物力学影响[J].医用生物力学,2020,35(3):356-363.  
WANG X, YANG Y, SUN XL, *et al.* Biomechanical effects of shoe cushioning on lower extremities during drop landing before and after neuromuscular fatigue [J]. J Med Biomech, 2020, 35(3): 356-363.
  - [20] UHORCHAK JM, SCOVILLE CR, WILLIAMS GN, *et al.* Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: A prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets [J]. Am J Sports Med, 2003, 31(6): 831-842.
  - [21] BENNETT DR, BLACKBURN JT, BOLING MC, *et al.* The relationship between anterior tibial shear force during a jump landing task and quadriceps and hamstring strength [J]. Clin Biomech, 2008, 23(9): 1165-1171.