

文章编号: 1004-7220(2025)01-0179-08

长距离负重行军对士兵下肢等速肌力和步态的影响

徐盛嘉, 夏铁城, 王巍, 韩满朝, 马继政

(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** 研究士兵长距离负重行军后下肢关节肌力和步态的变化, 探索下肢骨骼肌疲劳对步态的影响。 **方法** 15名男性士兵完成负重17.5 kg行军15 km后, 测试髋、膝、踝关节屈伸等速肌力, 并运用Vicon动作捕捉系统和AMTI测力台采集士兵负重行走和跑步的步态参数。 **结果** 负重行军后, 髋关节屈伸峰值力矩显著下降 ($P < 0.05$); 右侧屈膝和伸膝的平均功率显著下降 ($P < 0.05$); 踝关节跖屈的相对峰值力矩和平均功率显著下降 ($P < 0.05$)。步行时, 左侧髋屈角、膝屈伸角, 踝背屈角及内翻角均显著减少 ($P < 0.05$), 膝内收角显著增加 ($P < 0.05$), 左侧屈髋、屈膝和踝关节跖屈力矩和双侧膝内收力矩显著降低 ($P < 0.05$), 右侧伸髋力矩和地面反作用力显著增加 ($P < 0.05$)。跑步时, 步频显著降低 ($P < 0.01$), 左侧步宽显著增加 ($P < 0.05$), 左膝屈角、右踝背屈角显著减少 ($P < 0.05$), 膝内收角显著增加 ($P < 0.05$), 双侧屈髋、左侧屈膝、右侧踝背屈和膝内收力矩显著减少 ($P < 0.05$), 右侧地面反作用力显著增加 ($P < 0.05$)。 **结论** 长距离负重行军后下肢肌力下降, 尤其是髋关节。行军后负重行走步态使用了髋关节驱动机制, 但由于肌力下降, 出现膝过伸和膝外翻。跑步时则更多利用踝关节, 增加了踝关节的损伤风险。为优化步态, 增强负重能力和预防损伤, 需强化髋关节和腓绳肌群力量。

关键词: 负重行军; 步态; 疲劳; 等速肌力

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.01.024

Effects of Long-Distance Load Marching on Isometric Muscle Strength of Lower Limb and Gait in Soldiers

XU Shengjia, XIA Tiecheng, WANG Wei, HAN Manchao, MA Jizheng

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

Abstract: **Objective** To study the variations in lower limb muscle strength and gait after long-distance load marching in soldiers and to investigate the effects of muscle fatigue of the lower limbs on the walking and running gait. **Methods** Fifteen male soldiers completed a 15 km march with a 17.5 kg load carriage. The isometric muscle strength of the hip, knee, and ankle joints under flexion and extension were tested. The walking and running gait parameters were collected with a Vicon motion capture system and AMTI force platform. **Results** After load marching, the peak moment of the hip decreased significantly ($P < 0.05$), the mean power of the right knee decreased significantly ($P < 0.05$), and the relative peak moment and mean power of the ankle plantar flexion decreased significantly ($P < 0.05$). During walking, the left hip flexion, knee flexion and extension, ankle dorsiflexion, and inversion angles ($P < 0.05$) decreased significantly in conjunction with a significant increase in the knee inversion angle ($P < 0.05$). Additionally, the moments of left hip flexion, knee flexion, ankle plantar flexion, and bilateral knee inversion ($P < 0.05$) decreased significantly, coupled with a significant increase in the

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-04

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20211228), 基础加强计划技术领域基金项目 (2021-JCJQ-JJ-1021)

通信作者: 马继政, 教授, 硕士生导师, E-mail: mjz_mjj@sina.com

moments of right hip extension and vertical ground reaction forces ($P < 0.05$). During running, the step frequency decreased significantly ($P < 0.01$), and the left step width increased ($P < 0.05$). Both left and right ankle dorsiflexion angles decreased significantly ($P < 0.05$), whereas the knee adduction angle increased significantly ($P < 0.05$). Additionally, the moment of bilateral hip flexion, left knee flexion, right ankle dorsiflexion, and knee adduction decreased significantly ($P < 0.05$), and the ground reaction force on the right side increased significantly ($P < 0.05$). **Conclusions** The lower limb muscle strength decreased after long-distance marching. This was particularly so in the hip joint. The hip drive mechanism was used in the walking gait after marching. However, knee hyperextension and valgus occurred owing to the decreased muscle strength. The ankle joint was used more frequently during running. This increased the risk of ankle injury. It is necessary to strengthen the hip and hamstring muscle groups to optimize the gait, increase the load capacity, and prevent injury.

Key words: load marching; gait; fatigue; isokinetic muscle strength

对于士兵而言,负重行军是军事训练和作战中不可或缺的环节。然而,负重不仅会影响行军时的步态生物力学特征和运动效率,还可能增加能量消耗和骨骼肌损伤的风险,从而导致士兵的运动表现下降,对战斗力的维持产生负面影响^[1-2]。

研究表明,负重和疲劳是影响步态的两个主要相关风险因素^[3]。在负重条件下,关节的动力学和运动学、时空参数以及肌肉活动都会发生变化,表现为躯干弯曲增加、垂直地面反作用力增大、步频加快及步长缩短^[4]。肌肉活动的增加会加剧能量消耗,引发疲劳,导致非典型步态,进一步增加了损伤的风险^[5]。

负重军事行动常常伴随着疲劳。因此,研究在负重和疲劳共同作用下的步态特征具有重要的实际意义。负重行军会导致骨骼肌疲劳和肌力下降,士兵在携带 25 kg 背囊以 1.8 m/s 速度在平地和下坡行进 2 h 后,膝伸肌和躯干屈肌的力矩显著降低^[6]。

关于负重行军后步态变化的研究较少,且结果并不一致。例如,士兵在携带相当于 30% 体重的负重,在跑步机上行军 40 min (速度为 1.67 m/s) 后,踝关节背屈和膝关节屈曲的峰值显著增加,而膝关节伸肌力矩减少^[7]。另一项研究发现,在 32 名新兵负重 35 kg 完成 12.8 km 行军后,运动学变量没有变化^[8]。

长距离负重行军可能导致骨骼肌疲劳,引发不良步态,增加关节和肌肉损伤的风险,从而对士兵的作战能力产生不利影响。深入研究长距离负重行军后士兵骨骼肌肌力与步态的生物力学变化,以

及肌力下降和负重对步态的双重影响,可为建立损伤预防标准、设计针对性的负重训练计划提供实证依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为 15 名男性士兵,年龄 (23.32 ± 1.62) 岁,身高 (175.34 ± 4.14) cm,体质量为 (68.19 ± 3.12) kg,体质量指数 (body mass index, BMI) 为 (22.26 ± 0.46) kg/m^2 ,有规律地参加训练,每周不少于 4 次,受训年限为 2 年以上,且均有负重行军训练经历。排除超重或偏瘦的士兵,排除标准为 $\text{BMI} < 18.5 \text{ kg}/\text{m}^2$ 或 $\text{BMI} > 24.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

1.2 测试方案

15 名士兵共需要完成 4 次 15 km 负重行军,负重量为 17.5 kg。手持模拟枪,戴凯夫拉头盔,背双肩包(内置水壶、洗漱用品、衣物),着迷彩鞋,记录用时和心率。负重行军前后进行髌、膝、踝关节的等速肌力测试,以及正常步速行走(约 1.5 m/s)和行军速度跑(约 3.2 m/s)的步态测试。前测在负重行军 3 d 前进行,后测在每次负重行军后 20 min 内,保持原有着装进行。每次测试间隔不少于 3 d,期间禁止剧烈运动。

1.2.1 等速肌力测试 运用多关节等速测试系统 (System 4 pro, Biodex 公司, 美国) 进行髌、膝、踝关节屈/伸测试。安静值测试前,带领研究对象进行充分的热身和动作学习,熟悉测试流程,在整个测试过程中及时进行语言激励。髌关节测试姿态为仰卧,膝、踝关节测试姿势为坐姿,模式为向心/向

心,以 $60^\circ/\text{s}$ 角速度重复 5 次最大力量的屈伸动作。

1.2.2 步态测试 研究对象着紧身裤和负重装备,采用 Plug-in gait lower body 模型,在下肢髂前上棘 (L/RASI)、髂后上棘 (L/RPSI)、大腿外侧 (L/RTHI)、小腿外侧 (L/RTIB)、膝关节外侧 (L/RKNE)、踝关节外侧 (L/RANK)、足尖 (L/RTOE)、足跟 (L/RHEE) 共粘贴 16 个反光标标志点。分别进行走和跑的步态测试,运用 8 台 500 万像素高速红外摄像头和动作捕捉与分析系统 (V5, Vicon 公司,英国) 和 2 块三维测力台 (BMS400600, AMTI 公司,美国),采集运动学和动力学数据,采集频率分别为 200、1 000 Hz。研究对象左右脚分别通过 2 块测力台,记录整个步态周期的有效数据。

1.2.3 心率测试 运用团队心率仪 (Team pro, Firstbeat 公司,美国) 记录士兵整个负重行军过程中的 R-R 间期。

1.3 研究指标

等速肌力指标: 双侧屈伸关节肌群向心运动时的绝对峰值力矩 (peak torque, PT)、相对峰值力矩 (relative peak torque, RPT)、平均功率 (average power, AP)、主动肌与拮抗肌比率 (peak torque ratio, PTR)。

步态时空指标: 左右脚步频 (stride rate, SR)、步速 (walk speed, WS)、支撑相占比 (stance phase ratio, SPR)、单支撑时间 (single support, SS)、双支撑时间 (double support, DS)、步幅 (stride length, SL)、步宽 (step width, SW)。

运动学指标: 1 个完整的步态周期中双侧髋、膝、踝关节的屈角和伸角度、膝关节内收角度和踝关节内翻角度的峰值。

动力学指标: 支撑阶段双侧髋、膝、踝关节的屈伸力矩和垂直地面反作用力 (vertical ground reaction force, VGRF) 峰值。

心率指标: 安静心率、运动中的平均心率和最大心率。

1.4 数据处理

在 Vicon Nexus 2.9.0 中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,而后截取通过 2 块测力台的完整过程影像,将所需要的

数据输出为 ASC II 码文件。数据采用 SPSS 25.0 统计软件处理,负重行军前后测试指标在符合正态分布的前提下采用配对样本 t 检验。 $P < 0.05$ 表示有显著性差异, $P < 0.01$ 表示有非常显著性差异,结果以 (均数 \pm 标准差) 表示,采用 GraphPad Prism 9.3 软件进行绘图。

2 研究结果

2.1 负重行军用时和运动负荷

士兵 15 km 负重行军平均用时为 (78.34 \pm 6.75) min,安静心率为 (67.33 \pm 8.0) 次/min,运动中平均心率为 (164.67 \pm 7.73) 次/min,最大心率为 (181.63 \pm 9.62) 次/min。

2.2 负重行军后关节等速肌力变化

负重行军后,左侧屈髋肌群 PT、RPT、AP 均显著下降 ($P < 0.05$),伸髋肌群 PT 显著下降 ($P < 0.05$);右侧髋关节屈肌群的 PT 和 RPT 显著下降 ($P < 0.01$),伸髋肌群 PT、RPT 显著下降 ($P < 0.05$),见图 1。

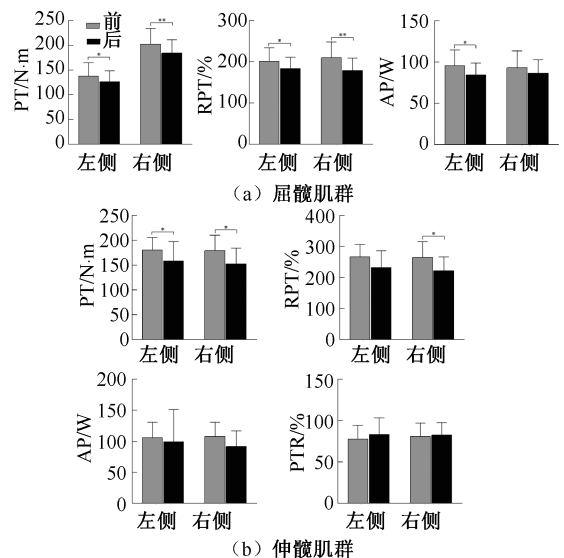


图 1 负重行军后髋关节等速肌力变化

Fig. 1 Changes in isokinetic muscle strength of hip joints after load marching (a) Hip flexor muscles, (b) Hip extensor muscles

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 下同。

负重行军后,右侧屈膝肌群和伸膝肌群的 AP 显著下降 ($P < 0.05$),见表 1。

表1 负重行军后膝关节等速肌力对比

Tab. 1 Comparison of isokinetic muscle strength of knee joints after load marching

| 动作 | PT/N·m | RPT/% | AP/W | PTR/% |
|-----|---------|---------|---------|--------|
| 屈膝 | | | | |
| 左 前 | 120.22± | 170.52± | 76.21± | |
| | 19.64 | 19.73 | 20.01 | |
| 左 后 | 117.10± | 166.08± | 70.63± | |
| | 13.16 | 20.83 | 17.08 | |
| 右 前 | 121.49± | 172.85± | 81.59± | |
| | 16.42 | 18.40 | 15.78 | |
| 右 后 | 114.19± | 165.87± | 71.37± | |
| | 25.79 | 34.02 | 18.82* | |
| 伸膝 | | | | |
| 左 前 | 222.06± | 316.83± | 136.03± | 55.19± |
| | 38.19 | 42.26 | 23.26 | 10.52 |
| 左 后 | 211.92± | 303.92± | 126.57± | 56.92± |
| | 40.34 | 48.48 | 33.18 | 11.47 |
| 右 前 | 224.40± | 322.85± | 138.69± | 54.94± |
| | 34.83 | 45.81 | 19.86 | 8.62 |
| 右 后 | 210.69± | 305.88± | 125.09± | 54.62± |
| | 43.84 | 56.49 | 27.93* | 10.54 |

负重行军后,左、右侧跖屈肌群 RPT、AP 显著下降($P<0.05$),右侧 PTR 显著增加($P<0.05$),见表 2。

表2 负重行军后踝关节等速肌力对比

Tab. 2 Comparison of isokinetic muscle strength of ankle joints after load marching

| 动作 | PT/N·m | RPT/% | AP/W | PTR/% |
|-----|---------|---------|--------|--------|
| 背屈 | | | | |
| 左 前 | 30.68± | 45.44± | 18.40± | |
| | 7.62 | 10.74 | 5.71 | |
| 左 后 | 32.52± | 49.10± | 20.01± | |
| | 6.37 | 8.84 | 4.75 | |
| 右 前 | 33.16± | 48.67± | 19.84± | |
| | 7.88 | 9.26 | 5.65 | |
| 右 后 | 33.81± | 50.98± | 19.89± | |
| | 6.07 | 7.61 | 6.00 | |
| 跖屈 | | | | |
| 左 前 | 87.13± | 135.90± | 48.45± | 34.63± |
| | 19.36 | 28.67 | 14.85 | 10.61 |
| 左 后 | 78.99± | 119.58± | 39.54± | 43.30± |
| | 17.53 | 27.24* | 11.04* | 14.63 |
| 右 前 | 105.37± | 165.36± | 57.77± | 30.75± |
| | 20.69 | 29.97 | 12.67 | 10.13 |
| 右 后 | 93.36± | 141.30± | 47.97± | 39.08± |
| | 22.75 | 34.33* | 14.90* | 14.98* |

2.3 负重行军后行走步态变化

负重行军后,行走时 SR、WS、SPR、SL、SW 略有增加,但差异均无统计学意义($P<0.05$),见表 3。

表3 负重行军后行走步态时空参数对比

Tab. 3 Comparison of spatiotemporal parameters under walking gait after load marching

| 参数 | 左侧 | | 右侧 | |
|---|---------|---------|---------|---------|
| | 前 | 后 | 前 | 后 |
| SR/ (min^{-1}) | 117.96± | 118.34± | 116.39± | 120.36± |
| WS/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 5.84 | 4.40 | 5.21 | 5.6 |
| SPR/% | 62.58± | 62.72± | 63.52± | 63.67± |
| SS/s | 1.62 | 0.88 | 1.36 | 1.28 |
| DS/s | 0.36± | 0.36± | 0.39± | 0.38± |
| SL/m | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| SW/m | 0.27± | 0.28± | 0.27± | 0.26± |
| | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.03 |
| | 1.33± | 1.38± | 1.37± | 1.37± |
| | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.09 |
| | 0.19± | 0.20± | 0.19± | 0.20± |
| | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.03 |

负重行军后,行走时左侧髋屈角、膝屈角、踝背屈角、踝内翻角均显著减少($P<0.05$),膝伸角显著降低($P<0.05$),内收角显著增加($P<0.05$),见表 4。

表4 负重行军后行走步态关节运动学指标对比

Tab. 4 Comparison of joint kinematic parameters under walking gait after load marching

| 参数 | 左侧 | | 右侧 | |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| | 前 | 后 | 前 | 后 |
| 髋屈角/(°) | 59.99± | 48.09± | 56.87± | 48.91± |
| | 3.40 | 5.34* | 3.35 | 5.38 |
| 髋伸角/(°) | 7.85± | -0.54± | 6.83± | -0.93± |
| | 3.16 | 5.22 | 3.05 | 4.58 |
| 膝屈角/(°) | 73.03± | 62.14± | 66.37± | 62.93± |
| | 6.22 | 3.00* | 7.24 | 8.07 |
| 膝伸角/(°) | 3.49± | -4.88± | 1.66± | -4.70± |
| | 4.01 | 2.38* | 2.65 | 4.55* |
| 膝内收角/(°) | 25.8± | 34.66± | 24.56± | 32.83± |
| | 6.81 | 7.66* | 7.11 | 7.37* |
| 踝背屈角/(°) | 20.72± | 17.78± | 19.01± | 18.58± |
| | 1.73 | 1.65* | 2.04 | 4.59 |
| 踝跖屈角/(°) | -15.22± | -17.21± | -17.15± | -19.01± |
| | 4.77 | 5.52 | 9.23 | 4.60 |
| 踝内翻角/(°) | 6.53± | 4.87± | 6.92± | 3.04± |
| | 1.00 | 1.08* | 2.40 | 3.37 |

负重行军后,行走时左侧髋屈、屈膝和踝关节跖屈力矩显著降低($P<0.05$),左右两侧膝内收力矩

显著降低($P<0.05$),右侧伸髋力矩和VGRF显著增加($P<0.05$),见图2。

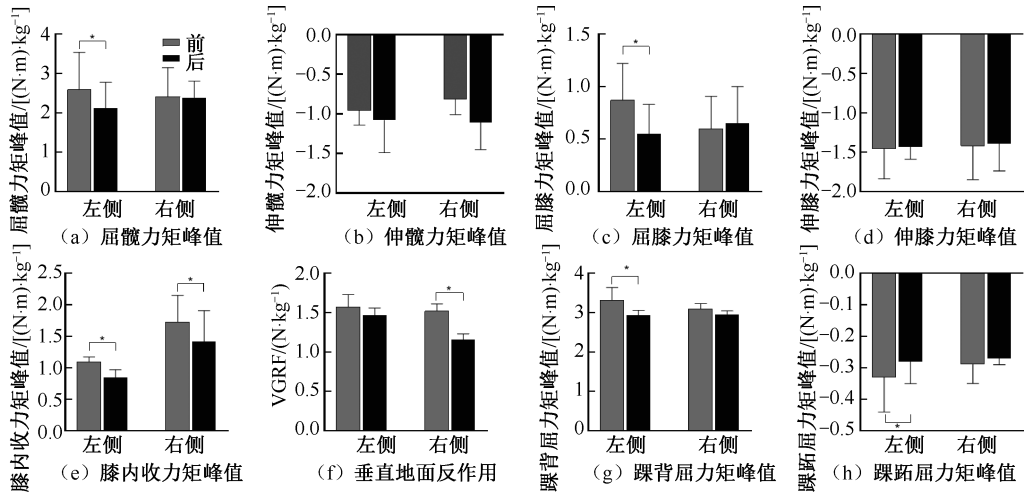


图2 负重行军后行走步态关节动力学指标变化

Fig. 2 Changes in joint dynamic parameters under walking gait after load marching (a) Peak moment of hip flexion, (b) Peak moment of hip extension, (c) Peak moment of knee flexion, (d) Peak moment of knee extension, (e) Peak moment of knee adduction, (f) Vertical ground reaction force, (g) Peak moment of ankle dorsiflexion, (h) Peak moment of plantar flexion

2.4 负重行军后跑步步态变化

负重行军后,跑步时双侧SR显著减少($P<0.01$),左侧SW显著增加($P<0.05$),见表5。

表5 负重行军后跑步步态时空参数对比

Tab. 5 Comparison of spatiotemporal parameters under running gait after load marching

| 参数 | 左侧 | | 右侧 | |
|---|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | 前 | 后 | 前 | 后 |
| SR/ (min^{-1}) | 185.87± 16.1 | 172.61± 14.4** | 185.78± 10.41 | 175.16± 16.5** |
| WS/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 3.14± 0.46 | 2.68± 0.29 | 3.17± 0.19 | 2.72± 0.45 |
| FO/% | 36.16± 5.89 | 43.75± 8.43 | 41.87± 3.94 | 32.41± 10.8 |
| SL/m | 2.02± 0.37 | 1.86± 0.11 | 2.17± 0.06 | 1.86± 0.17 |
| SW/m | 0.13± 0.07 | 0.16± 0.05* | 0.15± 0.07 | 0.17± 0.05 |

负重行军后,跑步时左侧髋屈角、膝屈角显著减少($P<0.05$),膝内收角显著增加($P<0.05$),见表6。

表6 负重行军后跑步步态关节运动学指标对比

Tab. 6 Comparison of joint kinematic parameters under running gait after load marching

| 参数 | 左侧 | | 右侧 | |
|----------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | 前 | 后 | 前 | 后 |
| 髋屈角/(°) | 70.84± 5.56 | 54.33± 8.19* | 66.4± 6.32 | 57.25± 5.73 |
| 髋伸角/(°) | 13.07± 4.83 | 7.53± 7.86 | 9.92± 5.57 | 6.62± 3.41 |
| 膝屈角/(°) | 91.61± 7.62 | 76.04± 10.53* | 82.21± 13.69 | 77.84± 9.37 |
| 膝伸角/(°) | 16.53± 6.57 | 9.11± 4.49 | 12.27± 5.60 | 11.30± 6.47 |
| 膝内收角/(°) | 28.14± 19.49 | 36.54± 8.42* | 27.66± 4.40 | 36.40± 16.55* |
| 踝背屈角/(°) | 35.19± 1.96 | 34.06± 5.15 | 39.01± 3.47 | 30.63± 1.16 |
| 踝跖屈角/(°) | -21.88± 2.39 | -19.63± 8.26 | -23.35± 5.02 | -20.78± 7.41 |
| 踝内翻角/(°) | 8.12± 0.74 | 4.59± 2.29 | 8.50± 2.80 | 2.95± 1.53 |

负重行军后,跑步时双侧髋屈、左侧屈膝、右侧踝背屈和膝内收力矩显著减少($P<0.05$),右侧VGRF显著增加($P<0.05$),见图3。

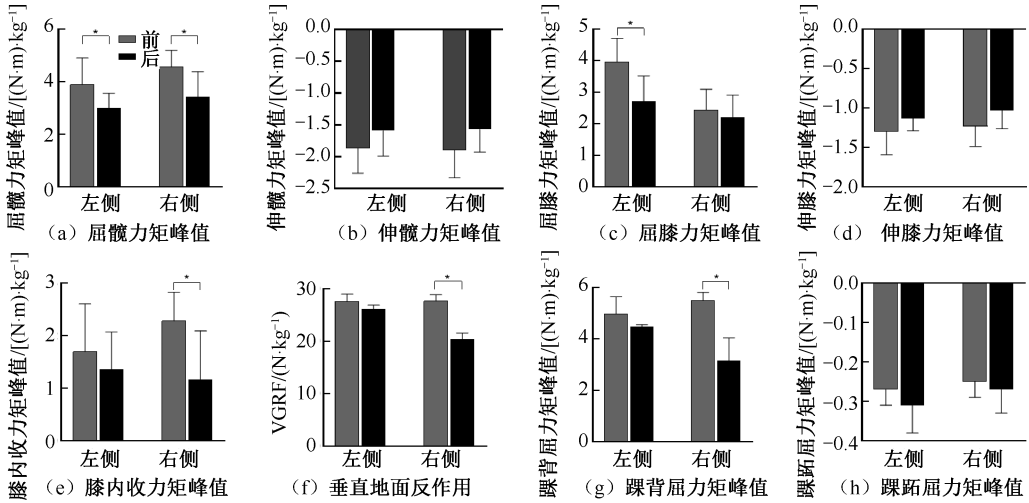


图3 负重行军后跑步步态关节动力学指标变化

Fig. 3 Changes in joint dynamic parameters under running gait after load marching (a) Peak moment of hip flexion, (b) Peak moment of hip extension, (c) Peak moment of knee flexion, (d) Peak moment of knee extension, (e) Peak moment of knee adduction, (f) Vertical ground reaction force, (g) Peak moment of ankle dorsiflexion, (h) Peak moment of plantar flexion

3 讨论

3.1 负重行军对肌力的影响

15 km 负重行军后,下肢关节屈伸肌群的最大力量在短期内下降。在现代军事行动中,士兵需要携带重装备执行多种高强度任务,对士兵的生理和心理造成极大压力,导致能量消耗增加、疲劳加剧和肌肉骨骼损伤。大强度耐力训练后,力量下降可能持续 96 h^[9]。其中,膝、踝关节的肌力受影响相对较小,髋关节的受到的影响较大,屈伸肌力显著下降。这是由于髋关节主导的运动策略减轻了对膝、踝关节的依赖,减少了这些部位的肌力下降^[10-11]。Lenton 等^[12]研究表明,负重行走时,约 65% 的能量由髋关节产生,这一发现也说明了髋部肌群在负重中承担了较大的工作强度,导致其疲劳程度较高。此外,疲劳还可能影响下肢主动肌和拮抗肌之间的平衡性,导致 PTR 增大,增加了损伤风险,尤其是踝关节。

3.2 负重行军对步态时空参数的影响

本文结果表明,负重行军后行走的步态时空参数并无显著性差异。最近一项荟萃分析发现,在 8 项研究中,有 5 项并未发现负重对步态时空参数有显著影响^[1]。本文推测,15 kg 负重相对较轻,且

行走测试任务较为简单,未能充分暴露急性运动后的疲劳效应,因此负重行军后的行走步态时空参数变化不大。

反之,跑步步态在行军后出现了显著变化,尤其是左侧步宽和步频显著减少。前期研究发现,行军至疲劳后,步宽的变异性增加,摔倒风险也随之提高^[12]。由于负重行军后肌肉力量和协调性的降低,以及负重对身体平衡和稳定性需求的增加,且大部分士兵的平衡非优势侧是左侧,因此增加了左侧的步宽以维持身体平衡。负重状态下,人体会减小步幅并提高步频以保持行进速度,但疲劳导致的不平衡使士兵的步频降低,从而有更多时间来计划、执行及调整步态动作^[13]。

3.3 负重行军对步态运动学参数的影响

在运动学参数方面,负重行军后左侧髋、膝、踝关节的屈曲角度在行走时显著减少,跑步时左侧的髋屈角和膝屈角也显著减少。为了降低对下肢关节的冲击,躯干、髋关节和膝关节在支撑阶段的屈曲角度会相应增加^[14]。出现与先前研究不一致的结果与个体的疲劳程度有关,随着疲劳程度的增加,下肢生物力学参数可能发生非线性变化^[15]。中度疲劳时,下肢关节落地的屈曲角度峰值增加;而重度疲劳时,屈曲角度的峰值反而会减小,导致更

多负荷转移到被动组织上,增加损伤风险^[16]。

此外,长时间负重行军后,行走时膝伸角降低,膝内收角增加,出现膝过伸和膝外翻。膝关节的稳定性依赖于周围肌肉力量平衡,而股四头肌和腓绳肌力量不平衡可能导致膝过伸^[17]。正常膝屈肌和膝伸肌力量比值应为 2:3 或 0.6 以上,但实验中士兵力量比值仅为 0.55。此外,膝内收角也超过了 30°,结果可能与股内外侧肌肌力不平衡或髌外展肌力下降有关。为防关节韧带损伤,需加强腓绳肌、股内侧肌及髌外展肌群力量训练。

3.4 负重行军对步态动力学参数的影响

动力学参数方面,负重行军后行走时伸髌力矩增加,而膝、踝关节力矩下降,显示士兵在疲劳状态下依赖髌关节推进。而跑步时髌伸力矩减少,踝跖屈力矩增加,表明士兵在负重和疲劳状态下跑步时更多依赖踝关节驱动。这种策略虽有助于推动身体前进,但增加了踝关节的负担和损伤风险^[18]。

负重行军中,髌关节应产生大部分正向功率,且髌肌群较不易疲劳^[9]。Teng 等^[10]研究发现,增加髌关节功率贡献可减少膝关节依赖,减轻压力。Blacker 等^[11]也指出,髌关节驱动可减轻膝、踝关节负担,保持步态稳定的同时降低损伤风险。因此,应加强髌肌群训练,保持以髌关节驱动为主的步态模式。

最后,长距离行军后左侧 VGRF 没有显著变化,右侧因肌力下降、缓冲不足,行走和跑步时 VGRF 增大。在落地的过程中,腿部肌群通过离心收缩缓解地面反作用力对骨骼的影响^[19]。然而,当骨骼肌发生疲劳并导致肌力下降时,其缓冲地面反作用力的能力也会相应减弱^[20]。

3.5 局限性与展望

本研究还存在一些不足之处:① 缺少 Visal 3D 建模和逆向动力学分析,只提供 VGRF 数据,未计算关节力;② 肌力测试限于下肢屈伸,未覆盖内收外展肌力,尤其髌关节评估不足;③ 疲劳判定不全,缺肌电频域分析和主观感受评价。

未来研究将探索不同负重量、运动方式、强度对士兵肌力和步态影响,提供全面生物力学分析和训练建议。

4 结论

长距离负重行军之后,士兵的下肢各关节肌力

普遍下降,尤其是髌关节的肌力损失最为严重。负重行军后,行走步态仍然倾向于使用髌关节的驱动作用,但出现膝过伸和外翻的情况。跑步则更多地依赖踝关节的驱动机制,导致地面反作用力的增加。

为了维持步态的稳定性,提高士兵的负重行军能力,预防下肢损伤,建议加强髌关节周围肌群和腓绳肌群的专项力量,并进行步态训练,更多地使用髌关节驱动机制,在提高行军效率的同时,降低由于肌肉疲劳或力量不平衡引起的损伤风险。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:徐盛嘉负责论文撰写;夏铁城、徐盛嘉负责等速肌力测试和步态测试;韩满朝、王巍负责负重行军和运动强度测试;马继政负责论文指导、实验指导。

参考文献:

- [1] WALSH GS, LOW DC. Military load carriage effects on the gait of military personnel: A systematic review [J]. *Appl Ergon*, 2021(93): 103376.
- [2] 陈彩盈,王斌,杨海晨. 国外军人负重作战能力训练与启示 [J]. *中国体育科技*, 2021, 57(8): 3-12.
- [3] HSIAO H, SIMEONOV P. Preventing falls from roofs: A critical review [J]. *Ergonomics*, 2001, 44(5): 537-561.
- [4] LIEW B, MORRIS S, NETTO K. The effect of backpack carriage on the biomechanics of walking: A systematic review and preliminary meta-analysis [J]. *J Appl Biomech*, 2016, 32(6): 614-629.
- [5] ANDERSEN KA, GRIMSHAW PN, KELSO RM, et al. Musculoskeletal lower limb injury risk in army populations [J]. *Sports Med*, 2016(2): 22.
- [6] QUESADA PM, MENGELKOCK LJ, HALES RC, et al. Biomechanical and metabolic effects of varying backpack loading on simulated marching [J]. *Ergonomics*, 2000, 43(4): 293-309.
- [7] PARK H, BRANSON D, KIM S, et al. Effect of armor and carrying load on body balance and leg muscle function [J]. *Gait Posture*, 2014, 39(1): 430-435.
- [8] RICE H, FALLOWFIELD J, ALLSOPP A, et al. Influence of a 12.8 km military load carriage activity on lower limb gait mechanics and muscle activity [J]. *Ergonomics*, 2017, 60(5): 649-656.
- [9] LEYK D, ROHDE U, ERLEY O, et al. Recovery of hand grip strength and hand steadiness after exhausting manual

- stretcher carriage [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2006, 96(5): 593-599.
- [10] TENG HL, POWERS CM. Hip-extensor strength, trunk posture, and use of the knee-extensor muscles during running [J]. *J Athl Train*, 2016, 51(7): 519-524.
- [11] BLACKER SD, FALLOWFIELD JL, BILZON JLJ, *et al.* Neuromuscular impairment following backpack load carriage [J]. *J Hum Kinet*, 2013, 37(1): 91-98.
- [12] LENTON GK, DOYLE TL, LLOYD DG, *et al.* Lower-limb joint work and power are modulated during load carriage based on load configuration and walking speed [J]. *J Biomech*, 2019(83): 174-180.
- [13] 陈洁颖. 肌肉疲劳对不同身体活动水平成年人步态特征的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张强, 胡婧, 伍颢. 不同分级神经肌肉疲劳对冲击性落地动作下肢生物力学的非线性影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2014, 33(12): 1153-1160.
- [17] BASCEVAN S, GILIC B, SUNDA M, *et al.* Isokinetic knee muscle strength parameters and anthropometric indices in athletes with and without hyperextended knees [J]. *Medicina*, 2024, 60(3): 367-387.
- [18] LEWIS CL, FERRIS DP. Walking with increased hip pushoff decreases hip muscle moments [J]. *J Biomech*, 2008, 41(10): 2082-2089.
- [19] 徐盛嘉, 赵寒治. 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[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(4): 754-758.
XU SJ, ZHAO HZ. Biomechanical characteristics of the knee joint during single-leg landing of soldiers and its relationship with isokinetic muscle strength [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(4): 754-758.
- [20] WANG H, FRAME J, OZIMEK EL, *et al.* Influence of fatigue and load carriage on mechanical loading during walking [J]. *Mil Med*, 2012, 177(2): 152-156.
-
- (上接第 162 页)
- [24] MOISAN G, DESCARREAU M, CANTIN V. Effects of chronic ankle instability on kinetics, kinematics and muscle activity during walking and running: A systematic review [J]. *Gait Posture*, 2017(52): 381-99.
- [25] 尹贻崑. 关节松动术配合常规运动疗法对青年人慢性踝关节不稳的干预作用[D]. 南宁: 广西师范大学, 2023.
- [26] KIM H, SON SJ, SEELEY MK, *et al.* Altered movement strategies during jump landing/cutting in patients with chronic ankle instability [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2019, 29(8): 1130-1140.
- [27] BARKEMA DD, DERRICK TR, MARTIN PE. Heel height affects lower extremity frontal plane joint moments during walking [J]. *Gait Posture*, 2012, 35(3): 483-488.
- [28] HONG WH, LEE YH, LIN YH, *et al.* Effect of shoe heel height and total-contact insert on muscle loading and foot stability while walking [J]. *Foot Ankle Int*, 2013, 34(2): 273-281.
- [29] 杨雯. 女学生踝部损伤原因及预防对策[J]. *安徽预防医学杂志*, 2000(2): 139-140.
- [30] SNOW RE, WILLIAMS KR. High heeled shoes: Their effect on center of mass position, posture, three-dimensional kinematics, rearfoot motion, and ground reaction forces [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1994, 75(5): 568-576.
- [31] FOSTER A, BLANCHETTE MG, CHOU YC, *et al.* The influence of heel height on frontal plane ankle biomechanics: Implications for lateral ankle sprains [J]. *Foot Ankle Int*, 2012, 33(1): 64-69.
- [32] SIMONSEN EB, SVENDSEN MB, NØRRESLET A, *et al.* Walking on high heels changes muscle activity and the dynamics of human walking significantly [J]. *J Appl Biomech*, 2012, 28(1): 20-28.