

文章编号: 1004-7220(2023)05-0996-07

慢性踝关节不稳对膝关节肌群的影响

黄留旻^{1#}, 闫兆奇^{1#}, 王星月¹, 蔡定坤¹, 王瀚升¹, 郑玲玲¹, 李志利², 姚杰¹

(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, 北京市生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100083; 2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要:目的 探究慢性踝关节不稳(chronic ankle instability, CAI)患者踝关节肌力缺失对患侧和健侧膝关节肌群的影响。方法 建立健康受试者和 CAI 患者逆向动力学模型,通过改变肌肉最大等长收缩力模拟不同程度踝关节肌力缺失,分析步态周期中膝关节峰值肌力和累积肌力的改变规律。结果 CAI 患者跖屈肌肌力缺失会同时影响患侧和健侧的股四头肌与腘绳肌,背屈肌肌力缺失主要影响患者患侧和健侧的腘绳肌。CAI 患者患侧和健侧膝关节肌群肌肉累积负荷增大,不同踝关节肌力缺失模型都呈现出患侧股四头肌累积负荷大于健侧,健侧腘绳肌累积负荷大于患侧的规律。结论 CAI 不仅会影响患者患侧膝关节肌群的肌力,也会影响患者健侧膝关节肌群的肌力。增强踝关节的肌肉力量和保护双侧膝关节肌肉可能对 CAI 康复具有积极的作用。

关键词:慢性踝关节不稳;步态;肌肉力量;肌肉累积负荷;逆向动力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.05.022

The Effect of Chronic Ankle Instability on Knee Joint Muscles

HUANG Liuyi^{1#}, YAN Zhaoqi^{1#}, WANG Xingyue¹, CAI Dingkun¹, WANG Hansheng¹, ZHENG Lingling¹, LI Zhili², YAO Jie¹

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Objective To study the effect of strength loss in ankle muscles on the injured and healthy side of knee joint muscles in patients with chronic ankle instability (CAI). **Methods** The inverse dynamic models of CAI patients and healthy subjects were established. The strength loss of ankle muscles at different degrees was simulated by changing the maximum isometric contraction force of muscles, and the change patterns for peak muscle strength and cumulative muscle strength of knee joints during a gait cycle were analyzed. **Results** The strength loss of plantar flexor muscle in CAI patients would affect both the quadriceps and hamstring muscles of the injured side and the healthy side. The strength loss of dorsal flexor muscle mainly affected the hamstring muscles of the injured side and the healthy side in CAI patients. The cumulative load on the injured side and the healthy side of knee joint muscles increased, and models with different strength loss of ankle muscles showed that the cumulative load of quadriceps femoris on the injured side was greater than that on the healthy side. The

收稿日期:2022-09-22;修回日期:2022-11-03

基金项目:北京市科技计划项目(Z211100004121005),载人航天工程航天医学实验领域资助项目(HYZHXM01003),中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-21-BJ-J-802),中国科协青年人才托举工程(YESS 2015QNRC001)

通信作者:姚杰,副教授,E-mail:astromilk@163.com

[#]为共同第一作者

cumulative load on hamstring muscle of the healthy side was greater than that of the injured side. **Conclusions** CAI will not only affect the patients' injured side of knee joint muscle strength, but also affect their healthy side. Strengthening the ankle muscles and protecting the bilateral knee muscles may have a positive effect on the rehabilitation of CAI.

Key words: chronic ankle instability (CAI); gait; muscle strength; muscle cumulative load; inverse dynamics

急性踝关节扭伤是一种常见的运动损伤。临床数据显示,在美国急诊科就诊的每 1 000 人中有 2~7 人患急性踝关节扭伤;考虑到许多患者未就医的情况,该比例可能更高^[1]。其中,高达 20%~50% 初次急性踝关节扭伤的患者因未及时治疗而导致关节松弛,并发展为慢性踝关节不稳(chronic ankle instability, CAI)^[2-3]。

CAI 是由于踝关节周围韧带损伤、本体感觉受损、肌肉机械延迟时间变长等病因导致患者关节活动受限、平衡和姿势控制异常,并以反复踝关节扭伤为主要临床表现的一种疾病^[4-5]。目前 CAI 康复主要采取主动的神经肌肉训练、肌肉力量训练和被动的贴布、针灸、理疗等方法,其诊断和疗效评估的方法主要有两种,分别为通过调查表和问卷方式判断患者临床表现,以及通过专科查体和影像学检查韧带受损情况^[4-5]。两种方法都无法定量评估踝关节功能,且前者尚无公认的统一标准^[6]。

一直以来,肌肉力量是研究 CAI 病理机制、量化诊断标准和康复效果的热点;又由于运动任务过程中下肢运动链近端节段和远端节段之间存在密切复杂的关系,越来越多的研究着眼于 CAI 与下肢近端关节肌力之间的关系。这些研究结果普遍表明,CAI 与近端关节肌力下降相关,且近端关节肌力下降会影响下肢的控制和稳定性^[7-13]。Lee 等^[7] 研究推测,近端关节肌力下降可能会导致身体重心定位更依赖于踝关节,从而使踝关节承受更多的生物力学和神经肌肉需求,并增加受伤的风险。因此,有必要探究近端关节在运动过程中的肌力变化。然而在相关研究中,有关膝关节肌群肌力的研究十分有限,且结果存在差异。Negahban 等^[12] 研究认为,CAI 患者患侧和健侧膝关节肌群都不受影响。但 Gribble 等^[14] 研究认为,膝关节肌群肌力有下降趋势。同时,CAI 患者在步态周期中膝关节肌群肌力的具体变化尚不可知。

针对上述问题,本文探究了 CAI 患者与健康人

群在步态周期中健侧和患病侧膝关节肌肉肌力的差异。通过改变踝关节肌肉肌力建立健康人群和 CAI 患者的模型,并基于逆向动力学方法进行仿真计算。分析结果为阐明 CAI 影响双侧膝关节肌力变化提供仿真数据支持,并为 CAI 诊断和疗效评估、康复方法等研究提供参考。

1 方法

1.1 模型选取和验证

采用 AnyBody 6.0 (AnyBody Technology 公司,德国)进行仿真建模以及逆向动力学分析。对 AnyBody 的 MoCap 模型中的下肢模型进行修改,模拟 CAI 患者踝关节肌力下降的情况。该模型包括 159 块肌肉和 6 个自由度,可完成人体肌肉的完整逆向动力学分析,并输出目标肌肉的肌肉单位力量等参数。

为评估 MoCap 步态模型仿真结果的准确性,需要对该模型计算结果进行验证^[15-16]。Pearson 相关系数常用来定量描述两个数据集合之间线性相似性,适用条件为两组连续数据变量之间是线性关系,两变量总体为正态分布或接近正态的单峰分布,两变量观测值成对。本文选取模型在 1 个步态周期中的胫骨前肌、腓肠肌、股二头肌肌力,与 Bovi 等^[17] 提供的 40 名健康样本相应的肌电 (electromyogram, EMG) 数据进行 Pearson 分析,以验证仿真所得肌力可信。

1.2 模拟踝关节肌力下降

CAI 在临床上分为机械性和功能性 CAI,其中机械性也可发展成为功能性。根据已有研究对 CAI 患者的肌力测试结果显示,踝关节肌力下降普遍存在于功能性 CAI,其中踝内外翻和跖屈的力矩减弱明显^[14,18-20],且可能引起急性踝关节扭伤从而导致踝关节韧带撕裂^[21]。肌力指肌肉主动收缩时产生的力量,肌力的表征形式之一为肌肉的最大力量,而最大等长收缩力是最大力量形式之一^[22]。踝关

节背屈的主要肌肉是胫骨前肌,跖屈的主要肌肉是腓骨长肌、腓肠肌和比目鱼肌。因此,本文将分别对这4种肌肉的最大等长收缩力 F_0 按照4个梯度条件(F_0 下降到75%、50%、25%、0%)进行减小,以建立CAI疾病模型。

将膝关节肌群中主要的4块肌肉(半腱肌、半膜肌、股四头肌、股二头肌)作为目标肌肉,以肌肉单位力量 F_m 在健侧和患侧的1个步态周期(支撑相约占60%;承重反应期、支撑相中期、末期、摆动前期;摆动相约占40%;摆动相早期、中期、末期)内的变化情况为基础,计算不同条件下 F_m 的差值和 F_m 与时间的积分。与健康对照组比较,肌力差($F_{m(CAI)} - F_{m(healthy)}$)可反映CAI患者肌力在每一时

刻的改变,肌肉累积负荷可反映CAI患者肌肉随时间累积受到的影响。

2 结果

2.1 模型验证结果

结果表明,腓肠肌、胫骨前肌、股二头肌EMG信号曲线同仿真肌力曲线的总体变化趋势具有一致性(见图1)。仿真结果和健康样本EMG数据有显著相关性($P < 0.001$),腓肠肌、胫骨前肌、股二头肌相关性系数分别为0.611 639、0.394 193、0.446 419(均值为0.484,中等相关)。考虑到EMG信号在采集过程中不可避免的噪声,本文认为,该模型的仿真结果可用于进一步分析和研究。

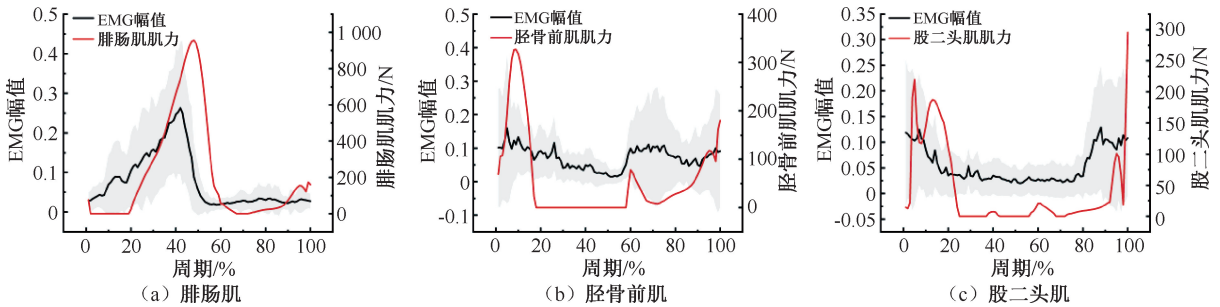


图1 归一化EMG信号与仿真计算肌力对比

Fig. 1 Comparison between normalized EMG signal and simulated muscle strength (a) Gastrocnemius, (b) Tibialis anterior muscle, (c) Biceps femoris

注:红线为仿真所得肌力;黑线与阴影分别为EMG信号均值与标准偏差。

2.2 肌力差结果

2.2.1 模拟比目鱼肌肌力下降 比目鱼肌肌力下降对半腱肌、半膜肌和股二头肌肌力几乎无影响,对股四头肌的肌力影响显著。健侧与患侧腿都以各自脚跟落地作为这侧腿步态周期的起点,下一次脚跟落地为步态周期终点。在各自的步态周期中,双侧股四头肌随比目鱼肌力下降,在支撑相中末期和摆动相前期肌力增大(见图2)。

2.2.2 模拟腓肠肌肌力下降 腓肠肌肌力下降对4种目标肌肉影响都明显。随着腓肠肌肌力下降,在患侧和健侧各自的步态周期中,半腱肌和半膜肌在支撑相中末期和摆动相中末期肌力增大;股四头肌在支撑相中末期和摆动前期的肌力减小;股二头肌在支撑相中末期,摆动前期肌力增大,在摆动相末期肌力减小(见图3)。

2.2.3 模拟腓骨长肌肌力下降 当腓骨长肌肌力

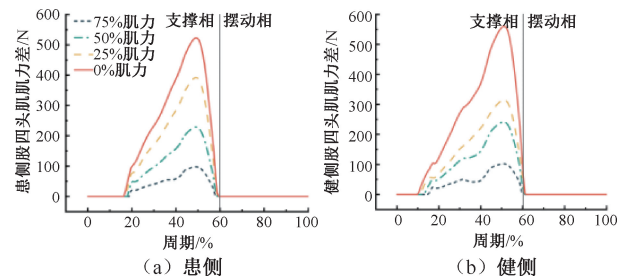


图2 比目鱼肌肌力下降时股四头肌力差对比

Fig. 2 Comparison of strength difference of quadriceps femoris when soleus muscle strength decreased

(a) Affected side, (b) Healthy side

下降时,对半腱肌、半膜肌和股二头肌的肌力的几乎无影响。两侧股四头肌肌力差的仿真结果表明,随着腓骨长肌肌力的下降,在患侧和健侧各自的步态周期中,股四头肌在支撑相中、末期和摆动前期肌力增大(见图4)。

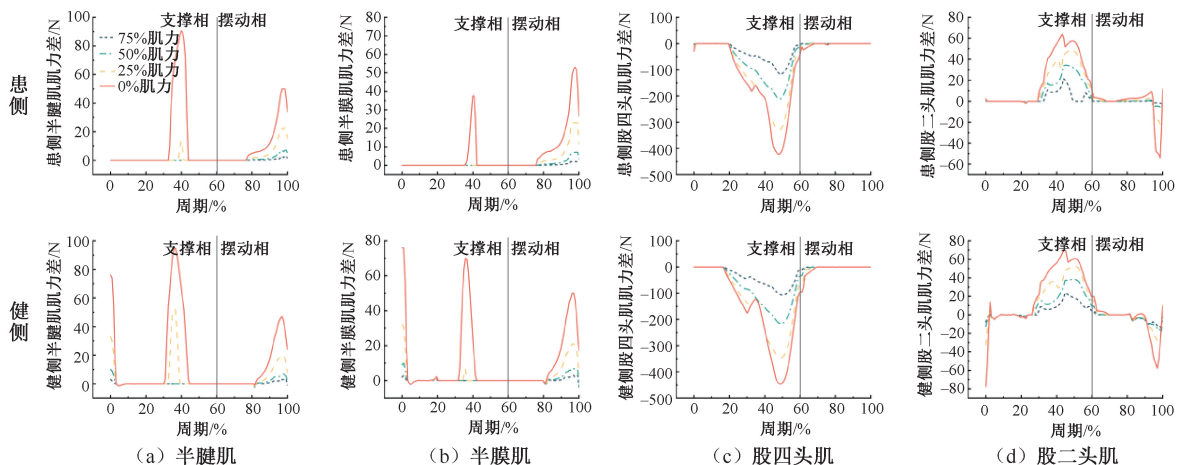


图3 腓肠肌肌力下降时膝关节肌群肌力差对比

Fig. 3 Comparison of strength difference in knee joint muscles when gastrocnemius muscle strength decreased

(a) Semitendinosus, (b) Semimembranosus, (c) Quadriceps femoris, (d) Biceps femoris

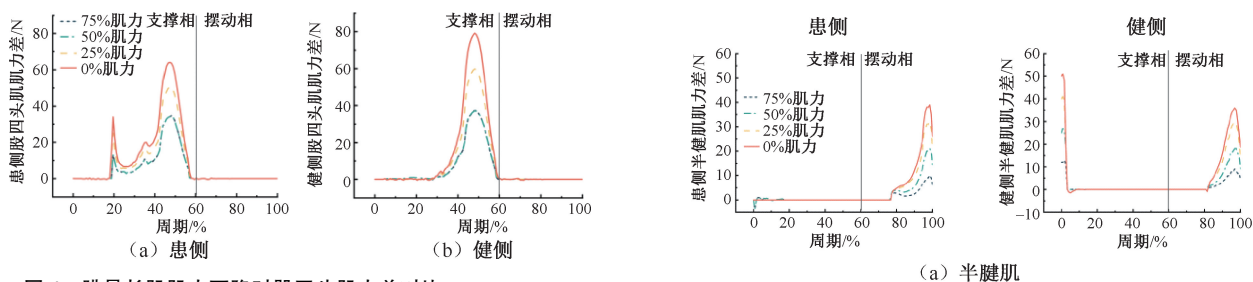


图4 腓骨长肌肌力下降时股四头肌力差对比

Fig. 4 Comparison of strength difference in quadriceps femoris when peroneus longus muscle strength decreased (a) Affected side, (b) Healthy side

2.2.4 模拟胫骨前肌肌力下降 胫骨前肌肌力减小对股四头肌和股二头肌肌力的影响较小,对半腱肌和半膜肌肌力的影响较大。两侧半腱肌、半膜肌肌力差的仿真结果表明,随着胫骨前肌肌力的下降,在患侧和健侧各自的步态周期中,半腱肌、半膜肌肌力在摆动相中、末期肌力增大(见图5)。

2.3 肌肉累积负荷结果

当比目鱼肌肌力下降时,两侧股四头肌的肌肉累积负荷增大,肌力下降为0时变化最明显:患侧股四头肌增大51.0%,健侧股四头肌增大69.7%。

当腓肠肌肌力下降时,两侧半腱肌、半膜肌、股二头肌的肌肉累积负荷增大,股四头肌肌肉累积负荷减小。肌力下降为0时变化最明显:患侧半腱肌、半膜肌、股二头肌分别增大55.9%、22.1%、31.5%,健侧半腱肌、半膜肌、股二头肌分别增大

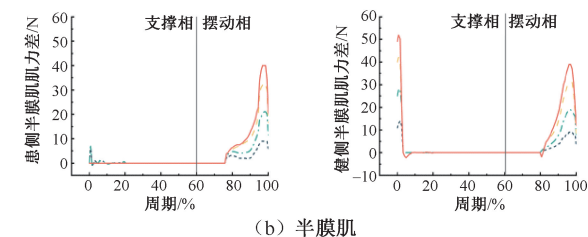


图5 胫骨前肌肌力下降时半腱肌、半膜肌力差对比

Fig. 5 Comparison of strength difference in semitendinosus and semimembranosus when tibialis anterior muscle strength decreased (a) Semitendinosus, (b) Semimembranosus

54.1%、29.5%、21.8%;患侧股四头肌减小34.5%,健侧股四头肌减小45.2%。

当腓骨长肌肌力下降时,两侧股四头肌的肌肉累积负荷增大。肌力下降为0时变化最明显:患侧股四头肌增大4.1%,健侧股四头肌增大4.7%。

当胫骨前肌肌力下降时,两侧半腱肌、半膜肌的肌肉累积负荷增大,肌力下降为0时变化最明显:患侧半腱肌、半膜肌分别增加17.1%、14.4%,健侧半腱肌、半膜肌分别增加17.8%、14.4%。

对比患侧和健侧的累积负荷可发现,在所有肌力缺失的情况下,患侧股四头肌累积负荷大于健侧、健侧腓绳肌累积负荷大于患侧。以各踝关节肌

力为50%的模拟情况为例,患侧股四头肌累积负荷至少大于健侧 $35.41 \text{ N}\cdot\text{s}$,健侧腓绳肌累积负荷至少大于患侧 $34.00 \text{ N}\cdot\text{s}$ (见图6)。

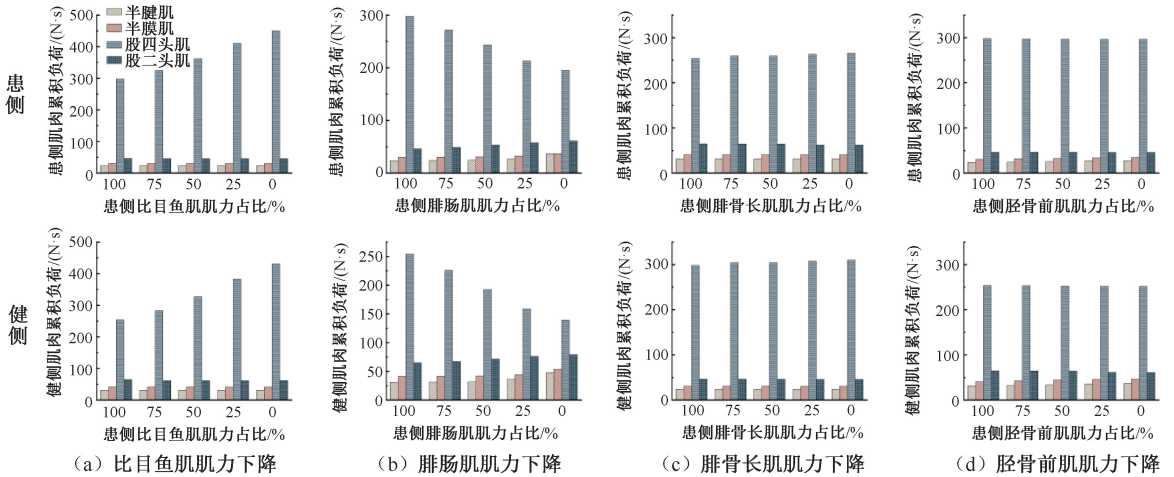


图6 不同肌力下降情况对两侧膝关节肌肉累积负荷的影响

Fig. 6 Effects of different muscle strength decrease on cumulative load of bilateral knee muscles (a) Soleus muscle strength decrease, (b) Gastrocnemius muscle strength decrease, (c) Peroneus longus muscle strength decrease, (d) Tibialis anterior muscle strength decrease

3 讨论

本文探究了CAI患者与健康人群在步态周期中健侧和患侧膝关节肌肉肌力的差异。通过AnyBody软件模拟踝关节肌力缺失情况,建立CAI患者和健康人群模型,并计算在1个步态周期中两种模型双膝关节肌群的肌力。结果显示,CAI与膝关节肌群肌力变化有关,且不同踝关节肌肉的肌力缺失对膝关节肌群的影响有差异。由于先前的研究使用等速力量测试仪等测量膝关节屈伸肌肉力矩以表征肌力^[13-14,23],无法显示1个步态周期的肌力变化,且这些实验室数据结果之间存在差异,故本研究结果可以作为CAI诊断和疗效评估、康复等相关研究的补充信息。

股四头肌肌力主要受踝关节跖屈肌肌力缺失的影响。跖屈肌群中的比目鱼肌和腓骨长肌肌力缺陷影响膝关节肌群的趋势一致,当这两块肌肉肌力下降时,CAI模型双侧的股四头肌较健康模型在支撑相中末期 F_m 均有上升趋势。而跖屈肌群中腓肠肌肌力缺陷对股四头肌的影响与前两块肌肉趋势相反,CAI模型双侧股四头肌在支撑相中末期 F_m 有下降趋势。支撑相中期比目鱼肌和腓肠肌起稳

定膝关节、控制胫骨向前惯性运动的作用,支撑相末期跖屈肌助足跟离地^[24],这可能是跖屈肌肌力缺失影响患侧腿在支撑相中末期的运动的原因。支撑相中末期膝关节有屈曲的动作,股四头肌作为伸膝肌参与维持膝关节的角度,这可能是患侧腿股四头肌受影响较大的原因。健侧腿受到影响的原因可能与肌肉协同作用有关。一些研究已经证明,人体的所有运动都需要全身肌肉的协调,例如上下肢之间存在双向耦合的肌肉激活作用^[25-26]。腓骨长肌是外翻踝关节的主要原动肌,而CAI的1个典型病症是踝关节过内翻次数病理性增多^[1]。上述结果表明,腓骨长肌肌肉肌力下降影响双侧腿股四头肌肌力,提示有必要加强双侧股四头肌锻炼与腓骨长肌肌力康复之间的关系。

踝关节背屈肌肌力缺失主要影响腓绳肌肌力,同时腓绳肌肌力也会受到跖屈肌肌力缺失的影响。背屈肌中胫骨前肌肌力缺失主要使得CAI模型双侧半腱肌、半膜肌在摆动相 F_m 上升,摆动相早中期单腿的抬起主要依靠背屈肌提足趾和屈膝肌屈曲膝关节实现^[24]。半腱肌和半膜肌作为腓绳肌的组成部分起屈膝作用,背屈肌的肌力缺失导致这两块肌肉在摆动相早中期 F_m 增大,推测与肌肉的代偿

作用有关。腓绳肌也受到腓肠肌肌力缺失的影响,腓肠肌肌力缺失导致两侧腿的半腱肌和半膜肌分别在其支撑相中末期和摆动相中末期 F_m 呈上升趋势,且肌力为 0% 与 25% 时差别较大,两侧腿的股二头肌在支撑相中末期 F_m 呈上升趋势、摆动相末期 F_m 呈下降趋势。支撑相末期足跟离地、膝关节有屈膝动作,主要依靠腓肠肌帮助跖屈和腓绳肌帮助屈膝实现,当腓肠肌肌力为 0% 时,代表踝关节急性受损腓肠肌无法正常发力,此动作需要完全依靠腓绳肌进行代偿,这可能是患侧腿半腱肌、半膜肌肌力为 0% 时受影响较大的原因。同作为腓绳肌的组成部分,半腱肌、半膜肌与股二头肌在同一侧、同一时相里受到影响的趋势不同,也可能与肌肉的代偿现象有关。健侧腿受到影响,可能与肌肉协同作用相关^[25-26]。这些结果提示,锻炼双侧的腓绳肌肌力可能有益于 CAI 患者在支撑相中末期和摆动相中末期的步态稳定,而步态稳定可能会进一步有助于 CAI 的康复^[7]。

上述讨论着重于某一目标肌肉实时的肌肉单位力量受到 CAI 影响的变化,而行走作为一项长期长时的运动任务,肌肉累积受到的影响对 CAI 研究有重要意义。通过对 F_m 与时间积分获得的肌肉累积负荷,可以作为肌肉长期受到的影响的定量指标。本文结果发现,不同的踝关节肌肉肌力缺失都使得膝关节肌群中本研究所计算的某一部分肌肉甚至所有肌肉累积负荷增大,提示 CAI 会导致膝关节肌群疲劳的可能,从而可能导致后续包括步态和肌力的病理性变化。已有研究认为,CAI 患者膝关节肌群肌力下降可能与此有关^[13-14],膝关节病变也可能会进一步加重踝关节的负荷^[7]。因此,对于膝关节肌肉进行保护,可能会对 CAI 预后有益。另外,本文对比结果表明,不同的踝关节肌力缺失模型都呈现出患侧股四头肌累积负荷大于健侧(以肌力 50% 模拟情况为例,至少大于 35.41 N·s),健侧腓绳肌累积负荷大于患侧(以肌力 50% 模拟情况为例,至少大于 34.00 N·s)的规律,提示对于 CAI 患者膝关节肌群的保护不仅需要考虑患侧,同时也需要考虑健侧。

本研究存在以下一些局限性:① 建立 CAI 模型时单独对踝关节肌群的某块肌肉的肌力缺失进行模拟,忽略了包括韧带生理特征的改变、肌肉激活

延迟等因素综合影响,在一定程度上影响了仿真结果的准确性,但踝关节肌肉的肌力缺失是功能性 CAI 的 1 个主要典型病症,故认为对这个生理现象的模拟以建立疾病模型有值得后续研究参考的意义;② 已有研究指出,在运动任务中,CAI 患者步态的运动学特征相较于健康人存在步速、加速、站位时间、摇摆时间的下降,而本文使用了健康人群运动学数据。但本文旨在模拟 CAI 患者维持正常步态情况下与健康人群之间膝关节肌群的差异规律。因此,本文虽然使用正常步态的运动学数据,但是结果也具有一定的意义。

4 结论

CAI 不仅影响患侧膝关节肌力,也会影响健侧膝关节肌力;CAI 患者跖屈肌肌力缺失会同时影响患侧和健侧的股四头肌与腓绳肌,背屈肌肌力缺失主要影响患者患侧和健侧的腓绳肌;CAI 使得双侧膝关节肌群肌肉累积负荷增大,其中患侧股四头肌肌肉累积负荷大于健侧,健侧腓绳肌肌肉累积负荷大于患侧;增强踝关节的肌肉力量和保护双侧膝关节肌肉可能对 CAI 的康复都有积极的作用。

参考文献:

- [1] HERZOG MM, KERR ZY, MARSHALL SW, et al. Epidemiology of ankle sprains and chronic ankle instability [J]. J Athl Train, 2019, 54(6): 603-610.
- [2] EAMONN D, BLEAKLEY CM, BOSSARD DS, et al. Clinical assessment of acute lateral ankle sprain injuries (ROAST): 2019 consensus statement and recommendations of the International ankle consortium [J]. Br J Sports Med, 2018, 52(20): 1304-1310.
- [3] DOHERTY C, BLEAKLEY C, HERTEL J, et al. Recovery from a first-time lateral ankle sprain and the predictors of chronic ankle instability: A prospective cohort analysis [J]. Am J Sports Med, 2016, 44(4): 995-1003.
- [4] HILLER CE, KILBREATH SL, REFSHAUGE KM. Chronic ankle instability: Evolution of the model [J]. J Athl Train, 2011, 46(2): 133.
- [5] HERTEL, MED JJCS. Sensorimotor deficits with ankle sprains and chronic ankle instability [J]. Clin Sports Med, 2008, 27(3): 353-370.
- [6] 侯宗辰, 敖英芳, 胡跃林, 等. 慢性踝关节不稳患者足底压力特征及相关因素分析 [J]. 北京大学学报(医学版), 2021, 53(2): 279-285.

- [7] LEE SP, POWERS CM. Individuals with diminished hip abductor muscle strength exhibit altered ankle biomechanics and neuromuscular activation during unipedal balance tasks [J]. *Gait Posture*, 2014, 39(3): 933-938.
- [8] LEE SP, SOUZA RB, POWERS CM. The influence of hip abductor muscle performance on dynamic postural stability in females with patellofemoral pain [J]. *Gait Posture*, 2012, 36(3): 425-429.
- [9] DOHERTY C, BLEAKLEY C, HERTEL J, *et al.* Lower extremity function during gait in participants with first time acute lateral ankle sprain compared to controls [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2015, 25(1): 182-192.
- [10] MAAS JC, HUIJING PA, DALLMEIJER AJ, *et al.* Decrease in ankle-foot dorsiflexion range of motion is related to increased knee flexion during gait in children with spastic cerebral palsy [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2015, 25(2): 339-346.
- [11] DE RIDDER R, WILLEMS T, VANRENTERGHEN J, *et al.* Lower limb landing biomechanics in subjects with chronic ankle instability [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(6): 1225-1231.
- [12] NEGAHBAN H, MORADIBOUSARI A, NAGHIBI S, *et al.* The eccentric torque production capacity of the ankle, knee, and hip muscle groups in patients with unilateral chronic ankle instability [J]. *Asian J Sports Med*, 2013, 4(2): 144-152.
- [13] KHALAJ N, VICENZINO B, SMITH MD. Hip and knee muscle torque and its relationship with dynamic balance in chronic ankle instability, copers and controls [J]. *J Sci Med Sport*, 2021, 24(7): 647-652.
- [14] GRIBBLE PA, ROBINSON RH. An examination of ankle, knee, and hip torque production in individuals with chronic ankle instability [J]. *J Strength Cond Res*, 2009, 23(2): 395-400.
- [15] 杨雨辰. 基于 AnyBody 的步态稳定性仿真分析及应用研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [16] 王凡嘉, 周晨磊, 罗丽娜, 等. 亚洲蹲和西方蹲的下肢关节运动学和肌肉激活比较 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 705-711.
- WANG FJ, ZHOU CL, LUO LN, *et al.* Comparison of the lower limb kinematics and muscle activation between Asian squat and Western squat [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 705-711.
- [17] BOVI G, RABUFFETTI M, MAZZOLENI P, *et al.* A multiple-task gait analysis approach: Kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects [J]. *Gait Posture*, 2011, 33(1): 6-13.
- [18] DAVID P, HALIMI M, MORA I, *et al.* Isokinetic testing of evertor and invertor muscles in patients with chronic ankle instability [J]. *J Appl Biomech*, 2013, 29(6): 696-704.
- [19] 宋桂芸, 赵建宇, 恽晓平, 等. 踝关节等速肌力测试在下肢关节损伤中的应用进展 [J]. *中国康复理论与实践*, 2019, 25(12): 1384-1388.
- [20] 张阳, 王志红, 朱德龙, 等. 功能性踝关节不稳者踝关节本体感觉及肌力的研究进展 [J]. *按摩与康复医学*, 2022, 13(13): 48-51.
- [21] 张耘. 急性踝关节损伤 40 例诊治体会 [J] *中医正骨*, 2005(10): 50.
- [22] 卢志泉, 夏正亮, 李玉章, 等. 肌肉力量的神经生物力学基础及诊断 [J]. *上海体育学院学报*, 2019, 43(3): 113-120.
- [23] NEGAHBAN H, MORADI-BOUSARI A, NAGHIBI S, *et al.* The eccentric torque production capacity of the ankle, knee, and hip muscle groups in patients with unilateral chronic ankle instability [J]. *Asian J Sports Med*, 2013, 4(2): 144-152.
- [24] VAUGHAN CL, DAVIS BL, PUBLISHERS JOJHK. Dynamics of human gait [M]. 2nd Edition. South Africa: Kiboho Publishers, 1999: 64-75.
- [25] HUANG HJ, FERRIS DP. Upper and lower limb muscle activation is bidirectionally and ipsilaterally coupled [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(9): 1778-1789.
- [26] KAWASHIMA N, NOZAKI D, ABE MO, *et al.* Shaping appropriate locomotive motor output through interlimb neural pathway within spinal cord in humans [J]. *J Neurophysiol*, 2008, 99(6): 2946-2955.