

不同护具对 FAI 者扭伤高危动作下肢运动学和动力学特征的影响

张美珍,尹超,张泽毅,杨亦敏,张振龙

(太原理工大学 体育与健康工程学院,太原 030024)

摘要:[目的]旨在分析 2 种护踝对功能性踝关节不稳(functional ankle instability,FAI)者执行快速变向着陆等动作时,其下肢运动学和动力学特性的影响,期望能够揭示不同踝关节护具在预防踝关节扭伤方面的保护机理.[方法]纳入 10 名功能性踝关节不稳者为测试对象,通过 Nokov Mars2H 红外光点 3 维运动捕捉系统和 Bertec 3 维力测台获得受试者分别佩戴半刚性护踝、弹性护踝和不佩戴任何护具时随机完成急停侧切、急停起跳落地及单脚跳箱落地动作的运动学与动力学特征.采用 3×3 重复测量方差分析验证护具和动作对 FAI 者下肢运动学和动力学特征的影响.[结果]动作和护踝仅对 FAI 者垂直 GRF 峰值有显著性交互作用($F_{[1,4]}=16.87, P<0.001$),与不佩戴任何护具相比,弹性和半刚性护踝可减小 FAI 者着地时刻踝关节跖屈角($P<0.001$)、内翻角($P<0.001, P=0.001$)、额状面 ROM($P=0.001, P<0.001$)、膝关节内旋角($P=0.005, P=0.002$)和垂直 GRF 峰值($P<0.001$),增大膝关节屈曲角($P<0.001, P=0.002$)和垂直方向 TTP($P<0.001$).相比半刚性护踝,弹性护踝可减小踝关节额状面 ROM($P=0.002$)和垂直 GRF 峰值($P<0.001$),增大膝关节屈曲角($P<0.001$)和垂直方向 TTP($P=0.004$).[结论]FAI 者佩戴弹性或半刚性护踝时,均可加强踝关节稳定性.与半刚性护踝相比,弹性护踝的防护效果更好.

关键词:FAI 患者;弹性护踝;半刚性护踝;踝关节扭伤;下肢着地特征

中图分类号:R318

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)04-0141-08

体育活动中踝关节损伤是下肢受伤的常见类型之一,损伤动作包括急停侧切(30.0%)、单腿落地(45.0%)、碰撞(10.0%)、跌倒(5.0%)、其他(5.0%)、急停起跳(2.5%)和绊倒(2.5%),单脚落地和急停侧切是造成踝关节损伤最主要的动作,占到踝关节损伤的 75.0%,可能是由于这 2 个动作在体育活动中较为常见且需要更强的踝关节稳定性^[1].急停起跳作为运动中出现频率较高的动作之一,虽然其造成的踝关节扭伤率仅有 2.5%,但其扭伤程度极为严重,多伴随踝关节韧带撕裂、骨折等,因此单脚落地、急停侧切和急停起跳被认为是踝关节扭伤的高危动作^[1-2].在踝关节损伤中踝关节扭伤,特别是外侧踝关节扭伤尤为突出^[3].已有研究指出 40%~75%的外侧踝关节扭伤患者可能发展为长期慢性踝关节不稳(chronic ankle instability,CAI)者,其主要是由于踝关节被迫内翻、跖屈或功能障碍等原因引起^[4].HERTEL 等^[5]将因本体感觉或神经肌肉缺陷导致的复发性踝关节不稳定义为功能性踝关节不稳定(functional ankle instability,FAI).踝关节神经肌肉控制不足表明关节动态稳定性的传入和传出功效降低,这种“失控感”会对运动过程中的姿势控制产生不利影响.

收稿日期:2024-09-27;**修回日期:**2024-11-06.

基金项目:首批教育部新文科研究与改革实践项目(2021050026);2024 年山西省高等学校教学改革创新项目(J20240379);2024 年度山西省研究生教育创新计划项目(2024SZ04);太原理工大学百亿工程经费资助.

作者简介(通信作者):张美珍(1983—),女,山西吕梁人,太原理工大学教授,博士,主要研究方向为运动生物力学和运动健康促进,E-mail:meizhen1116@163.com.

引用本文:张美珍,尹超,张泽毅,等.不同护具对 FAI 者扭伤高危动作下肢运动学和动力学特征的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(4):141-148.(Zhang Meizhen, Yin Chao, Zhang Zeyi, et al. Effects of different ankle braces on lower extremity kinematics and kinetics for FAI During High-risk maneuvers related to ankle sprains[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(4): 141-148. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.09.27.0001.)

研究表明,通过增加踝关节周围肌肉力量和提升神经肌肉协调性训练,以及佩戴踝关节护具或贴扎等方法可作为预防踝关节扭伤的手段,护踝在限制踝关节额状面活动范围(range of motion,ROM)方面已被证明优于贴扎,特别是在运动后预防效果更为显著^[6].此外,与其他措施相比,护踝还因其持久的预防效果、易于操作、无皮肤刺激、可重复使用、成本低以及对运动影响极小等优点而备受推崇.护踝分为刚性和功能性(半刚性和弹性/系带式)2类,刚性护踝使整个踝关节固定不动,而功能性护踝允许踝关节的一些跖屈和背屈,同时控制内翻和外翻,因此在运动过程中的防护多选用功能性护踝^[7].已有学者指出功能性护踝会改变着地动作的神经肌肉控制^[8].然而,不同类型护踝对下肢运动特征的具体影响以及防护效果上的差异,学术界尚存在一定争议.在模拟踝关节内翻跌落的被动环境下进行的实验表明,弹性和半刚性护踝可减小踝关节峰值内翻角、额状面活动范围^[9].此外,还有学者指出佩戴半刚性护踝可以限制被动内翻情形下的踝关节内翻角和跖屈角^[10].CORDOVA 等^[11]的研究提出,半刚性护踝比系带弹性护踝能够更有效地减少足跟角位移和速度,然而这些研究是在缺乏实际运动功能的模拟实验,在真实的着地过程中,可能需要更大的力来克服支撑阻力,这可能导致对踝关节运动范围的最大值评估不足.为了更准确地理解护踝的保护机制,有研究者通过模拟更真实的动作,如落地^[12]、侧切^[13]来确定护踝的防护机制,但这些研究在护踝对实际落地时的运动学特征、地面反作用力、肌肉用力特征等方面尚未达成共识^[12].有研究发现,半刚性护踝、改良的半刚性护踝和软套设计护踝均未能限制侧切动作时的踝关节内翻^[14].相反,另一项研究则提出半刚性护踝可以限制侧切着地时的踝关节峰值内翻角^[13].可见,对于这 2 种护踝的防护效果,前人的研究显示出相矛盾的结果,需要进一步研究在执行踝关节扭伤高危动作时不同护踝的防护效果.

综上,将功能性踝关节不稳定者作为研究人群,针对其易伤动作,如急停起跳落地、侧切和单脚落地跳等进行研究.通过分析可更全面地理解不同类型护踝对 FAI 者在实际着陆动作中采取的运动策略的影响,本研究成果将为 FAI 者在选择踝关节支撑装置时提供更加可靠的实验依据.基于以往文献和本研究目的验证以下假设:半刚性护踝和弹性护踝均对预防 FAI 者踝关节扭伤具有积极效果,且单脚落地时的运动特征可能更易致伤.

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究根据功能性踝关节不稳定的诊断标准选取研究对象,参与者需符合以下条件:至少经历过 2 次踝关节扭伤,且在功能活动中感受到关节失控;根据坎伯兰踝关节不稳定性量表的评分,得分不超过 24 分;没有下肢手术或骨折等病史;首次踝关节扭伤发生在实验前至少 12 月;前抽屉试验和距骨倾斜试验结果为阴性.如果参与者存在以下任何一种情况,则不符合研究条件:有关节复位或下肢手术的历史;在过去 3 月内下肢遭受急性损伤;距骨前倾试验或前抽屉试验结果为阳性;患有下肢骨性关节炎、头部创伤、内耳疾病或肌肉营养不良;Beighton 关节活动度评分超过 4 分.由于 92%的踝关节扭伤发生于优势侧^[15],本研究选取优势侧为患侧的 FAI 患者为研究对象,根据这些标准,募集了 10 名功能性踝关节不稳患者(详见表 1).本实验采用了重复测量设计,护踝类型和测试动作均为重复变量.通过 G * Power 3.1.9.6 软件计算所需样本量,设定效应量 $d=0.6$,显著性水平 $\alpha=0.05$,统计功效 $(1-\beta)=0.8$,得出至少需要 9 名参与者,因此本研究的样本量足以满足统计分析的要求.本研究获得了太原理工大学科学和伦理委员会批准(TYUT-202305003),所有参与者在测试前均已阅读并签署了知情同意书.

表 1 受试者基本信息统计描述
Tab. 1 Basic information of subjects

身高/cm	体质量/kg	训练年限/a	CAIT 得分/分
183.6±5.8	78.1±5.9	5.8±3.0	19.8±1.9

1.2 研究方法

1.2.1 实验设备

本研究对比了 2 种类型的护踝:弹性护踝(195 型,美国,McDavid)和半刚性护踝(Active ankle T2,美

国,Cramer)(图 1).所有参与者均穿着统一的测试服装,包括运动鞋、紧身上衣和短裤.测试前进行5 min准备活动,将 29 个直径 15 mm 的反光 Marker 球进行黏贴^[16].采用红外运动捕捉系统(Nokov Mars2H)获得受试者在进行侧切、急停起跳落地和跳箱单腿落地等动作时的运动学特征,采样频率为 200 Hz.同步通过 Bertec(美国)3 维测力台以 1 kHz 的采样频率得到受试者的下肢动力学特征.要求每名受试者佩戴不同护踝完成 3 次有效测试动作.动作要求:1)急停侧切动作要求受试者在距测力台 6 m 处助跑,在测力台台面上以患侧(优势腿)为支撑,支撑腿快速制动、蹬伸,并沿原运动方向的左或右前 45°方向继续奔跑;2)急停起跳动作要求受试者以自选最大速度助跑加速 6 m 后,双腿在测力台台面上完成急停制动,并立刻全力垂直起跳,双足同时落到测力台后立即进行快速前冲;3)单腿落地动作要求受试者双手叉腰,站立于高度为 35 cm 的跳箱上,足尖向前,测试开始后沿跳箱边缘单腿跳下,使用患侧(优势腿)着地支撑(图 2).



图1 护踝类型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the type of ankle brace



图2 测试动作示意图

Fig.2 Diagram of maneuvers

1.2.2 数据处理

本研究采用 Cortex-64 2.6.2(Motion Analysis Inc,USA)软件对运动学数据进行分析.通过反光标志点构建人体下肢的多刚体模型,并利用欧拉角法计算 3 维角度.根据标志点坐标建立骨盆坐标系、大腿坐标系和小腿坐标系.骨盆坐标系由右髂前上棘点,左髂前上棘点和髂后上棘中点确定.根据 BELL 等^[17]的研究数据和骨盆坐标系计算髋关节转动中心坐标.大腿坐标系由股骨内侧髁点、股骨外上侧髁点以及髋关节中心点确定.膝关节转动中心为股骨内外侧髁中点.小腿坐标系由外踝点、内踝点以及膝关节中心点确定,踝关节中心被定义为内踝和外踝的中点^[18].屈伸角、内外翻角和内外旋角分别通过绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的转动获得.所有标志点的坐标数据经过 Butterworth 低通滤波器平滑处理,截断频率设为 13 Hz.动力学数据首先经过 50 Hz 的低通滤波处理,随后通过逆向动力学方法在 MS3D7.0 软件(Motion Soft Inc,USA)中估算了 3 维力矩,并进行标准化(力矩峰值除以身高(H)和体重(W)的乘积).着地时刻被定义为垂直地面反作用力(ground reaction force,GRF)超过 20 N 的瞬间,峰值时刻是指关节活动达到最大程度时.关节活动范围 ROM 是指关节角度的最大值与最小值之间的差.GRF 数据被标准化为体重的倍数,并据此计算了达到 GRF 峰值所需的时间(time to peak GRF, TTP).

1.2.3 统计分析

本研究通过 3×3 重复设计的双因素方差分析(ANOVA)探究不同踝关节护具(无护踝、弹性护踝、半刚性护踝)及动作任务(侧切、急停起跳落地、单脚落地)对下肢运动生物力学特征的影响.若因素间存在显著性交互作用,则分别进行单因素方差分析分别比较动作间和护踝间下肢运动生物力学特征的差异.主效应差异采用 LSD 进行校正,统计分析的显著性标准定为一类误差概率不大于 0.05.

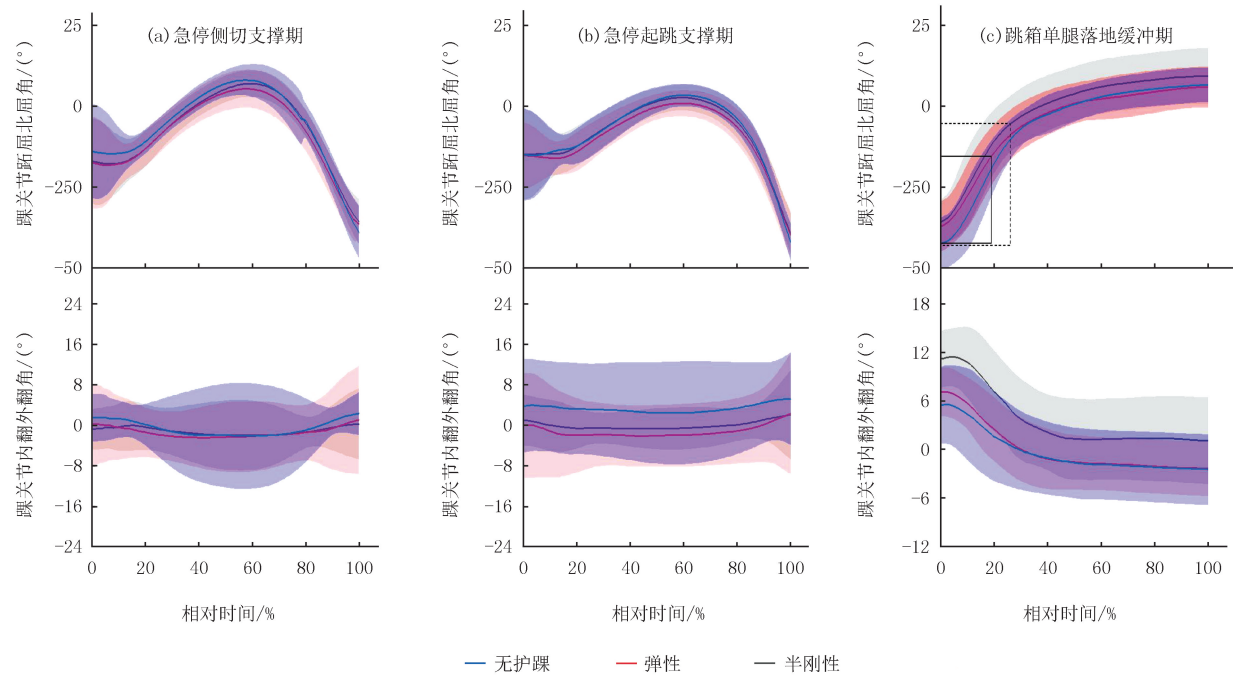
2 结果

双因素方差分析结果显示,护踝和动作仅对垂直 GRF 峰值有显著性交互作用($F_{[1,4]} = 16.87, P <$

0.001).

2.1 护踝和动作对踝关节运动学和动力学的影响

单因素方差分析结果表明,相较于无护踝状态,FAI 者佩戴弹性和半刚性护踝时着地时刻踝关节跖屈角(38.5° vs. 15.1° vs. 16.1° , $P<0.001$, $P<0.001$)、内翻角(7.4° vs. 1.6° vs. 0.3° , $P<0.001$, $P=0.001$)和额状面 ROM(14.5° vs. 10.0° vs. 12.6° , $P=0.001$, $P<0.001$)显著降低.另外,与半刚性护踝相比,FAI 者佩戴弹性护踝时额状面 ROM($P=0.002$)明显减小.在不考虑护踝类型的条件下,FAI 者跳箱单腿落地动作的踝关节矢状面 ROM 较急停侧切(47.4° vs. 43.3° , $P=0.018$)和急停起跳动作大(47.4° vs. 41.8° , $P=0.001$),相比无护踝,弹性和半刚性护踝分别于 0%~19%、0%~26% 的跳箱单腿落地缓冲期中限制 FAI 者踝关节跖屈角($P<0.05$)(图 3).



注:踝关节解剖姿势为0°,矢状面上大于0°为背屈,小于0°为跖屈;冠状面上大于0°为内翻,小于0°为外翻.

图3 护踝和动作对踝关节运动学的影响趋势

Fig.3 Effect of ankle braces and maneuvers on ankle kinematics

2.2 护踝和动作对着地时刻膝关节运动学和动力学的影响

单因素方差分析结果表明,不论动作,相比无护踝,FAI 者佩戴弹性护踝时着地时刻膝关节屈曲角增大(15.5° vs. 34.0° , $P<0.001$),膝关节外翻角(-2.6° vs. -0.23° , $P=0.034$)和内旋角(12.0° vs. 2.2° , $P=0.005$)减小.佩戴半刚性护踝时着地时刻膝关节屈曲角(15.5° vs. 22.0° , $P=0.002$)和内旋力矩($-0.000\ 3HW$ vs. $0.000\ 6HW$, $P=0.029$)增大,膝关节内旋角减小(12.0° vs. 1.2° , $P=0.002$).此外,相比半刚性护踝,FAI 者佩戴弹性护踝时膝关节屈曲角增大(22.0° vs. 34.0° , $P<0.001$),见表 2.

2.3 护踝和动作对 GRF 和 TTP 的影响

单因素方差分析结果表明,相比无护踝,FAI 者佩戴弹性和半刚性护踝时垂直方向 TTP 延长($42.3\ ms$ vs. $113\ ms$ vs. $88.2\ ms$, $P<0.001$, $P<0.001$).其中,在急停侧切($10.7W$ vs. $3.7W$ vs. $5.1W$, $P<0.001$, $P<0.001$)、急停起跳($11.0W$ vs. $3.8W$ vs. $5.0W$, $P<0.001$, $P<0.001$)和跳箱单腿落地($19.1W$ vs. $3.7W$ vs. $5.0W$, $P<0.001$, $P<0.001$)动作中,FAI 者佩戴弹性和半刚性护踝时垂直 GRF 峰值均减小.在无护踝状态下,FAI 者跳箱单腿落地时垂直 GRF 峰值均高于急停侧切($19.1W$ vs. $10.7W$, $P<0.001$)和急停起跳($19.1W$ vs. $11.0W$, $P<0.001$)(表 3).

表 2 护踝和动作对着地时刻膝关节角度和力矩的影响

Tab. 2 Effect of ankle braces and maneuvers on knee angle and moment at initial contact

变量	急停侧切			急停起跳			跳箱单脚落地		
	无护踝	弹性	半刚性	无护踝	弹性	半刚性	无护踝	弹性	半刚性
膝关节屈曲角/(°)	16.3±7.3 ^{ab}	34.6±7.8 ^c	22.4±9.8	15.9±6.9 ^{ab}	32.9±5.9 ^c	22.0±11.3	14.2±6.5 ^{ab}	34.6±7.8 ^c	21.7±7.7
膝关节外翻角/(°)	-2.6±6.3 ^a	-0.3±4.8	-1.7±3.7	-3.2±3.4 ^a	-0.1±4.9	-1.8±4.3	-1.9±2.8 ^a	-0.3±1.8	-1.4±3.5
膝关节内旋角/(°)	3.8±11.4 ^{ab}	3.7±14.4	2.2±11.8	16.1±9.9 ^{ab}	2.4±12.7	0.3±15.7	16.0±9.7 ^{ab}	0.4±14.6	0.9±17.3
膝关节屈曲力矩/(HW)	0.024±0.012	0.011±0.006	0.033±0.011	0.025±0.008	0.017±0.007	0.033±0.016	0.026±0.009	0.014±0.007	0.031±0.014
膝关节内外翻力矩/ (HW)	-0.002 7±0.006 4	-0.003 2±0.004 5	-0.001 8±0.006 9	-0.001 3±0.003 8	0.000 2±0.005 1	-0.000 8±0.010 9	-0.004 7±0.005 8	0.000 9±0.002 9	-0.003 6±0.011 3
膝关节内外旋力矩/ (HW)	-0.000 1±0.002 1 ^b	0.000 7±0.000 8	0.000 4±0.001 2	-0.000 5±0.002 0 ^b	0.000 3±0.002 9	0.000 6±0.001 1	-0.000 4±0.001 9 ^b	0.000 4±0.001 6	0.000 8±0.000 9

注:a 表示弹性护踝与无护踝存在显著差异;b 表示半刚性护踝与无护踝存在显著差异;c 表示弹性护踝与半刚性护踝存在显著差异。下同。

表 3 护踝和动作对 GRF 和 TTP 的影响

Tab. 3 Effect of braces and maneuvers on GRF and TTP

变量	急停侧切			急停起跳			跳箱单脚落地		
	无护踝	弹性	半刚性	无护踝	弹性	半刚性	无护踝	弹性	半刚性
前后 GRF 峰值/W	0.7±0.3 ^{ab}	0.1±0.1 ^c	0.4±0.1	0.6±0.3 ^{ab}	0.2±0.2 ^c	0.4±0.1	0.6±0.2 ^{ab}	0.1±0.1 ^c	0.4±0.1
内外 GRF 峰值/W	1.3±1.1 ^{ab}	0.4±0.4 ^c	0.7±0.3	1.2±1.0 ^{ab}	0.3±0.3 ^c	0.8±0.4	1.2±1.0 ^{ab}	0.3±0.3 ^c	0.7±0.3
垂直 GRF 峰值/W	10.7±2.1 ^{abc}	3.7±0.6 ^c	5.1±0.8	11.0±2.0 ^{abf}	3.8±0.8 ^c	5.0±1.0	19.1 ^{ab}	3.7±0.7 ^c	5.0±1.0
前后方向 TTP/ms	50.1±42.3 ^{ab}	212.8±153.8	212.7±38.3	40.2±9.0 ^{ab}	210.8±157.1	217.2±52.4	38.0±5.0 ^{ab}	213.2±154.0	211.4±45.8
内外方向 TTP/ms	33.4±14.0 ^{ab}	86.0±61.2	72.1±63.4	39.6±12.1 ^{ab}	129.3±82.3	76.9±67.8	32.2±15.2 ^{ab}	82.7±78.6	80.2±69.2
垂直方向 TTP/ms	40.9±3.4 ^{ab}	108.1±71.5 ^c	85.3±36.7	40.9±6.0 ^{ab}	129±63.8 ^c	82.0±36.3	45.1±5.8 ^{ab}	101.3±83.4 ^c	97.3±32.4

3 分析与讨论

3.1 护踝和动作对踝关节生物力学的影响

本研究结果得出弹性护踝和半刚性护踝相比无护踝均能够有效降低 FAI 者着地时刻踝关节内翻角、跖屈角和额状面 ROM,提升了踝关节着地时的稳定性,从而可能降低踝关节扭伤风险.这一发现与流行病学数据相呼应,后者指出约 70%的踝关节损伤由过度内翻和跖屈引起^[1].此外,已有研究支持限制踝关节内翻角可以减轻外侧韧带的负担,减少扭伤风险,对于有踝关节扭伤史的人群,跖屈角的增加可能导致距骨在踝穴中的不稳定摇摆,增加扭伤的可能性^[12].DIGIOVANNI 等^[19]研究表明随着踝关节跖屈角的增大,距腓前韧带载荷亦随之变大,可能导致损伤.本研究进一步发现,在执行特定动作如急停侧切、急停起跳落地和跳箱单腿落地时,FAI 者佩戴弹性护踝和半刚性护踝可以显著限制踝关节的运动.然而先前研究也证实在步行和跑步时,弹性护踝相比半刚性护踝更能减少踝关节内翻角,这可能归因于测试动作的差异,亦再次佐证了本研究的必要性^[20].FAI 者佩戴护踝进行与损伤相关的高危落地动作时,可能防护效果更显著.此外,本研究还发现弹性护踝在限制踝关节内外翻方面的效果更为显著,这与 CORDOVA 等^[11]的研究一致.究其原因可能源于护踝材料和结构,半刚性护踝使用半刚性夹板对踝关节两侧进行支撑保护,而弹性护踝则通过 8 字缠绕形成牵拉保护,使得其包裹性较半刚性护踝更佳,进而可更有效地限制踝关节额状面活动范围^[12].综上,本研究支持使用弹性和半刚性护踝来限制 FAI 患者的踝关节运动,这可能有助于减少重复扭伤的风险.

本研究结果显示 FAI 者佩戴弹性和半刚性护踝相比无护踝对踝关节跖屈背屈活动范围无显著影响,可能有利于落地缓冲增加踝关节矢状面活动范围是一种有益的着地策略,可避免产生较大的地面反作用力,进而减小下肢负荷.然而,对于 FAI 者若增大踝关节矢状面活动范围,则可能会增加踝周肌肉及韧带的载荷,从而增大踝关节慢性损伤风险,相应地,若限制踝关节矢状面活动范围将不利于缓冲垂直地面反作用力,进而导致踝周软骨、肌肉和韧带负荷增加,亦可能增加踝关节重复扭伤的风险^[21],此外,垂直地面反作用力可能会向上传递至髌、膝关节并使其负荷增加^[22].在本研究中,2 种护踝均未影响踝关节矢状面活动范围似乎是较为理想的结果,因为它可能潜在地保护了踝关节.理论上,一款理想的高防护性护踝应该能够限制踝关节在额状面上的运动,同时不约束矢状面上的活动.值得注意的是,FAI 者进行跳箱单脚落地动作时,其踝关节矢状面活动范围较侧切、急停起跳更大,这可能是侧切和急停起跳要求参与者在着地后立即进行侧向或垂直移动,需要下肢具有一定的刚性来完成这些动作,从而导致矢状面上的活动范围受限^[23].而在跳箱单脚落地时,由于地面反作用力较大,推测人体可能会增加矢状面活动范围以更有效地缓冲着地时的冲击力.

由此可见,FAI 者无论是佩戴弹性护踝还是半刚性护踝均能有效控制踝关节的内翻角、跖屈角以及额状面的活动范围,进而实现其防护功能.特别地,弹性护踝在限制踝关节额状面活动范围方面,相较于半刚性护踝展现出更为明显的限制效果,能提供更好的保护.

3.2 护踝和动作对膝关节生物力学的影响

本研究观察到 FAI 者佩戴弹性和半刚性护踝时膝关节屈角增大,垂直 GRF 减小,且达到峰值的时间有所延长.这种变化可能促使患者调整其落地策略,而积极的屈膝已被证明能够有效缓冲 GRF,延长到达峰值的时间,从而可能降低踝关节扭伤的风险^[24].此外,大量研究已证实膝关节屈曲角还与前交叉韧带损伤密切相关,过小的膝关节屈曲角会产生较大的胫骨向前剪切力,增加前交叉韧带损伤风险^[16].本研究还注意到,FAI 者佩戴护踝后,膝关节内旋角减小,特别是弹性护踝还进一步减小了膝关节外翻角.流行病学和实验研究显示,膝关节外翻角、内旋角可能与 ACL 损伤风险有关,然而尚未达成共识^[16].综上,FAI 者佩戴弹性和半刚性护踝后的运动特征对于减少踝关节损伤风险具有积极作用,其对膝关节前交叉韧带的潜在影响仍需进一步探索.

在本研究中,跳箱单脚落地动作产生的垂直地面反作用力较侧切和急停起跳落地动作有显著增加. VALDERRABANO 等^[25]发现,这种增加的 GRF 可能提升踝关节扭伤的风险,并可能促进踝关节的退行性变化,这亦佐证了为何落地时踝关节扭伤风险更大.值得关注的是,FAI 患者可能会遭受踝关节扭伤和退行性变化的长期困扰,不仅引起疼痛和肿胀,还可能造成踝关节功能受限,严重时甚至发展为创伤性关节炎.究其原因可能是 FAI 者踝关节的神经肌肉控制能力较差,导致踝关节损伤风险增大.因此,对于 FAI 患者,控制 GRF 的增加对于预防踝关节损伤尤为重要.

3.3 研究的局限性及展望

本项研究聚焦于 FAI 者佩戴不同类型护踝进行落地动作时的运动表现,其成果对于实际应用具有一定的指导意义.然而,亦存在一些局限性.有研究指出,踝关节扭伤的发病率高峰发生在 15~19 岁之间,15~24 岁的男性踝关节扭伤的发生率明显高于女性,而 30 岁以上女性的发病率高于男性^[26],本实验的研究对象虽然属于扭伤高发人群,但并未研究护踝对踝关节扭伤高发年龄段女性的影响,未来还应针对此类人群展开研究.另外,将近一半(49.3%)的踝关节扭伤发生在体育运动中,尤其是篮球(41.1%)、橄榄球(9.3%)和足球(7.9%)^[26],后续研究还应对比护踝对不同专项的运动员的影响.此外,本研究仅考察了护踝对 FAI 患者的即时效应,而未深入探讨长期佩戴的影响.鉴于此,未来研究可综合分析不同性别、不同专项 FAI 高危人群佩戴各类护踝的运动生物力学特征,以更全面和系统地了解其防护效果.

4 结 论

半刚性护踝和弹性护踝对处于踝关节损伤的非急性期的 18~24 岁男性 FAI 者均有一定的防护效果,且弹性护踝更为突出,并可能有助于降低膝关节负荷.建议该人群在进行体育活动时考虑使用弹性护踝,以

提供额外的保护.FAI 者进行着地动作时佩戴弹性和半刚性护踝,能有效控制踝关节内翻角和跖屈角,减小踝关节额状面活动范围,使膝关节以更屈曲的姿势着地,这有助于减少垂直 GRF 并延缓达到峰值的时间,从而可能降低踝关节重复扭伤的风险.在弹性与半刚性护踝之间,弹性护踝在这些方面的积极效果更为明显.本研究还发现在进行跳箱单脚落地动作时,由于踝关节矢状面上的活动范围和垂直 GRF 较大,FAI 患者可能面临更高的踝关节扭伤风险,建议采取有效的缓冲策略以降低过大的地面反作用力,避免引起膝、踝关节损伤.

参 考 文 献

- [1] MCKAY G D, GOLDIE P A, PAYNE W R, et al. Ankle injuries in basketball: injury rate and risk factors[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2001, 35(2): 103-108.
- [2] DEVITA P, SKELLY W A. Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1992, 24(1): 108-115.
- [3] 关国平, 孟强, 牛文鑫, 等. 踝关节扭伤防护及其康复研究进展[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(1): 78-82.
GUAN G P, MENG Q, NIU W X, et al. Research progress of ankle sprains, protection and rehabilitation[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2016, 31(1): 78-82.
- [4] HUBBARD T J, HICKS-LITTLE C, WIKSTROM E A, et al. Chronic ankle instability: factors that influence the ability to return to sports[J]. *J Athl Train*, 2022, 57(1): S45.
- [5] HERTEL J, MCKEON P. The effectiveness of ankle taping and bracing in reducing ankle joint motion during sudden inversion: A systematic review and meta-analysis[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2020, 45(S3): S312-S322.
- [6] MOK K M, FONG D T, YUNG P S, et al. Effectiveness of ankle brace on mechanical properties of ankle joint complex during sports activities: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Med Int*, 2019, 4(1): 1-10.
- [7] MEGALAA T, LE P L, FONG YAN A, et al. Do ankle braces affect functional performance? A randomised double-blinded cross-over trial [J]. *JSAMS Plus*, 2024, 4: 100061.
- [8] 张泽毅, 李文彦, 范婷, 等. 护踝类型对落地时下肢运动学的影响: Meta 分析和系统评价[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(2): 361-368.
ZHANG Z Y, LI W Y, FAN T, et al. The effect of ankle brace on biomechanics of the lower extremity during landing: a systematic review and meta analysis[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2022, 37(2): 361-368.
- [9] ZHANG S N, WORTLEY M, CHEN Q J, et al. Efficacy of an ankle brace with a subtalar locking system in inversion control in dynamic movements[J]. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 2009, 39(12): 875-883.
- [10] ALFUTH M, KLEIN D, KOCH R, et al. Biomechanical comparison of 3 ankle braces with and without free rotation in the sagittal plane [J]. *Journal of Athletic Training*, 2014, 49(5): 608-616.
- [11] CORDOVA M L, DORROUGH J L, KIOUS K, et al. Prophylactic ankle bracing reduces rearfoot motion during sudden inversion[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2007, 17(3): 216-222.
- [12] AGRES A N, CHRYSANTHOU M, RAFFALT P C. The effect of ankle bracing on kinematics in simulated sprain and drop landings: a double-blind, placebo-controlled study[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2019, 47(6): 1480-1487.
- [13] KLEM N R, WILD C Y, WILLIAMS S A, et al. Effect of external ankle support on ankle and knee biomechanics during the cutting maneuver in basketball players[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2017, 45(3): 685-691.
- [14] DOHERTY C, DELAHUNT E, CAULFIELD B, et al. The effect of ankle brace use on lower-extremity kinematics during landing tasks [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(2): 192-198.
- [15] BEYNNON B D, MURPHY D F, ALOSA D M. Predictive factors for lateral ankle sprains: a literature review[J]. *Journal of Athletic Training*, 2002, 37(4): 376-380.
- [16] 张美珍, 郭浩, 刘卉, 等. 不同运动性疲劳方案对足球专项大学生躯干和下肢运动学特征的影响[J]. *中国体育科技*, 2022, 58(8): 32-40.
ZHANG M Z, GUO H, LIU H, et al. Effect of different fatigue protocols on trunk and lower extremity kinematics for collegiate soccer players[J]. *China Sport Science and Technology*, 2022, 58(8): 32-40.
- [17] BEAULIEU M L, LAMONTAGNE M, XU L Y. Gender differences in time-frequency EMG analysis of unanticipated cutting maneuvers [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2008, 40(10): 1795-1804.
- [18] WU G, SIEGLER S, ALLARD P, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion: part I: ankle, hip, and spine. *International Society of Biomechanics* [J]. *Journal of Biomechanics*, 2002, 35(4): 543-548.
- [19] DIGIOVANNI B F, PARTAL G, BAUMHAUER J F. Acute ankle injury and chronic lateral instability in the athlete[J]. *Clinics in Sports Medicine*, 2004, 23(1): 1-19.
- [20] 杨亦敏, 张泽毅, 刘卉, 等. 护踝对功能性踝关节不稳患者下肢运动生物力学特征的影响[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(4): 742-748.

YANG Y M,ZHANG Z Y,LIU H,et al.Effects of ankle braces on lower extremity biomechanics of patients with functional ankle instability[J].Journal of Medical Biomechanics,2023,38(4):742-748.

[21] 刘羽多,万祥林.本体感觉神经肌肉促进法和全身振动训练对功能性踝关节不稳干预效果的比较[J].中国康复理论与实践,2022,28(7):776-782.

LIU Y D,WAN X L.Comparison of effects of proprioceptive neuromuscular facilitation and whole body vibration training on functional ankle instability[J].Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice,2022,28(7):776-782.

[22] 张战毅.我国 U15 女子篮球运动员的体能特征研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(6):138-144.

ZHANG Z Y.Physical fitness characteristics of Chinese U15 women basketball athletes[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2022,50(6):138-144.

[23] PENG H T.Changes in biomechanical properties during drop jumps of incremental height[J].Journal of Strength and Conditioning Research,2011,25(9):2510-2518.

[24] ZHOU X,WU D,WU X D,et al.A novel prophylactic Chinese parachute ankle brace[J].Annals of Translational Medicine,2021,9(4):318.

[25] VALDERRABANO V,HORISBERGER M,RUSSELL I,et al.Etiology of ankle osteoarthritis[J].Clinical Orthopaedics and Related Research,2009,467(7):1800-1806.

[26] WATERMAN B R,OWENS B D,DAVEY S,et al.The epidemiology of ankle sprains in the United States[J].The Journal of Bone and Joint Surgery American Volume,2010,92(13):2279-2284.

Effects of different ankle braces on lower extremity kinematics and kinetics for FAI during high-risk maneuvers related to ankle sprains

Zhang Meizhen, Yin Chao, Zhang Zeyi, Yang Yimin, Zhang Zhenlong

(School of Physical Education and Health Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective]The study aimed to investigate the lower extremity biomechanical characteristics of different ankle braces on functional ankle instability(FAI) individuals during rapid directional changes and landing maneuvers related to ankle sprains, in order to gain comprehensive understanding of the protective mechanism for ankle braces. [Methods]10 FAI participants were randomly selected to wear semi-rigid ankle brace, elastic ankle brace and no ankle brace when performing side-cutting, stop jump landing and single-leg drop jump from box using a random number generator for assignment. 3D motion capture system(Nokov Mars2H) and force plate(Bertec) were used to obtain kinematic and kinetic data for subjects. A two-way repeated measures 3×3 ANOVA was used to verify the effects of ankle brace and maneuvers on lower extremity kinematic and dynamic characteristics of the lower limbs in individuals with FAI. [Results]The results showed a significant interaction between maneuver and ankle brace on peak vertical GRF for FAI individual($F_{[1,4]}=16.87, P<0.001$). Compared with no ankle brace, elastic and semi-rigid ankle braces reduced ankle plantarflexion angle($P<0.001$), inversion angle($P<0.001, P=0.001$), frontal plane ROM($P=0.001, P<0.001$), knee internal rotation angle($P=0.005, P=0.002$) and peak vertical GRF at initial contact($P<0.001$), increased knee flexion angle($P<0.001, P=0.002$) and vertical TTP($P<0.001$). In addition, compared with the semi-rigid ankle brace, the elastic brace reduced ankle frontal ROM($P=0.002$) and peak vertical GRF($P<0.001$) and increased knee flexion angle($P<0.001$) and vertical TTP($P=0.004$). [Conclusion]When FAI wears elastic or semi-rigid ankle protection, it can strengthen the stability of ankle joint. Compared with semi-rigid ankle braces, elastic ankle braces was more prominent.

Keywords: FAI patient; elastic ankle brace; semi-rigid ankle brace; ankle sprain; lower extremity biomechanics

[责任编辑 杨浦 刘洋]