

文章编号: 1004-7220(2025)01-0156-07

鞋跟高度对慢性踝关节不稳女性平地行走时 踝关节运动控制的影响

赵春燕¹, 闫晓芹¹, 王疆娜², 程静静³, 孙威²(1. 山东体育学院 研究生教育学院, 济南 250102; 2. 山东体育学院 运动与健康学院, 济南 250102;
3. 山东省体育训练中心, 济南 250102)

摘要:目的 探讨慢性踝关节不稳女性(chronic ankle instability, CAI)穿着不同高度高跟鞋行走时对踝关节运动控制的影响。**方法** 采用 Vicon 红外运动捕捉系统和三维测力台同步采集 20 名健康女性和 20 名 CAI 女性穿着 4 种高度(1、3、5、7 cm)高跟鞋平地行走时足着地前后 200 ms 内的运动学、动力学参数。应用双因素重复方差分析对数据进行统计分析。**结果** 足着地时内翻峰值角速度以及内翻峰值角度存在组别×鞋跟高度的交互效应。经事后检验结果显示,在健康组内,与鞋跟 1 cm 相比,穿着 5 cm($P=0.002$)、7 cm($P=0.002$)高跟鞋行走时在足着地前后 200 ms 内翻峰值角速度显著较大;穿着 1 cm 与 5 cm($P=0.018$)、7 cm($P<0.001$)高跟鞋行走时内翻角度峰值有显著性差异。在 CAI 组,与鞋跟 1 cm 相比,穿着 5 cm($P=0.002$)、7 cm($P=0.002$)高跟鞋行走时在足着地前后 200 ms 内翻峰值角速度显著较大;穿着 1 cm 与 3 cm($P<0.001$)、5 cm($P<0.001$)、7 cm($P<0.001$)高跟鞋行走时内翻峰值角度有显著性差异。在足着地前后 200 ms 内跖屈峰值角度($P<0.001$)、外旋峰值角度($P<0.001$)、外旋峰值角速度($P<0.001$)、跖屈峰值力矩($P=0.048$)存在显著的高度主效应;外翻峰值力矩存在显著的组别主效应($P<0.001$)。**结论** 与健康人相比,CAI 女性穿着高跟鞋行走时踝关节控制能力较弱,随着跟高增加,踝关节稳定性降低,建议 CAI 女性穿着 3 cm 以下高度的高跟鞋。

关键词: 高跟鞋; 慢性踝关节不稳; 运动控制; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.01.021

The Effect of Heel Height on Ankle Motion Control During Level Walking in Women with Chronic Ankle Instability

ZHAO Chunyan¹, YAN Xiaoqin¹, WANG Jiangna², CHENG Jingjing³, SUN Wei²

(1. College of Graduate Education, Shandong Sport University, Ji'nan 250102, China; 2. College of Sports and Health, Shandong Sport University, Ji'nan 250102, China; 3. Shandong Sports Training Center, Ji'nan 250102, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of wearing high-heeled shoes at different heel heights on ankle joint motion control during walking in women with chronic ankle instability (CAI). **Methods** The Vicon infrared motion capture system and a three-dimensional force plate were used to synchronously collect kinematic and kinetic parameters within 200 ms before and after foot contact for 20 healthy females and 20 CAI females while walking on flat ground wearing high-heeled shoes at different heel heights (1, 3, 5, and 7 cm). Two-way

收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-08-22

基金项目: 国家体育总局科技创新项目(24KJCX065), 济南市市校融合发展战略工程项目(JNSX2023088), 山东省青少年教育科学规划项目(24BH223)

通信作者: 孙威, 副教授, E-mail: sunwei841024@163.com

repeated measures ANOVA was applied to analyze the data statistically. **Results** There was an interaction effect between group and heel height on the peak inversion angular velocity and peak inversion angle during foot strike. Post-hoc tests revealed that within the healthy group, compared to a 1 cm heel, the 5 cm ($P=0.002$) and 7 cm ($P=0.002$) heels had significantly greater peak inversion angular velocity within 200 ms before and after foot strike; there were significant differences in peak inversion angle between the 1 cm and 5 cm ($P=0.018$), 7 cm ($P<0.001$) heels. In the CAI group, compared to a 1 cm heel, the 5 cm ($P=0.002$) and 7 cm ($P=0.002$) heels had significantly greater peak inversion angular velocity within 200 ms before and after foot strike; there were significant differences in peak inversion angle between the 1 cm and 3 cm ($P<0.001$), 5 cm ($P<0.001$), 7 cm ($P<0.001$) heels. There was a significant main effect of height on peak plantarflexion angle ($P<0.001$), peak external rotation angle ($P<0.001$), peak external rotation angular velocity ($P<0.001$), and peak plantarflexion torque ($P=0.048$) within 200 ms before and after foot strike; there was a significant main effect of group on peak eversion torque ($P<0.001$). **Conclusions** Compared to healthy individuals, women with CAI have reduced ankle joint control while walking with high-heeled shoes. As heel height increases, the ankle stability decreases. It is recommended that women with CAI should wear high-heeled shoes with a heel height of 3 cm or below.

Key words: high-heeled shoes; chronic ankle instability; motor control; biomechanics

急性踝关节扭伤是最常见的运动损伤之一,且多达 73% 的患者会反复扭伤,其中 59% 的患者有残留症状,如慢性踝关节不稳定(chronic ankle instability, CAI)^[1-2]。CAI 是指踝关节内翻扭伤后出现的慢性运动损伤性疾病,主要表现为踝关节的疼痛肿胀、反复扭伤、不稳定感及自觉踝关节功能下降等症状^[3]。踝关节扭伤通常发生在踝关节接触地面早期,此时踝处于内翻位置,容易发生扭伤。且有研究表明,与健康人相比,CAI 患者在足跟着地前后 200 ms 踝关节内翻角度增大^[4],腓骨长肌激活降低、反应时间延迟^[5],也会进一步导致踝内翻增加,更易扭伤。

高跟鞋经几个世纪的发展和改良,已成为现代女性生活中不可或缺的一部分。据调查统计,目前约有 72% 成年女性穿高跟鞋,其中 39% 女性由于社交场合和职业要求等情况需要每天穿着高跟鞋^[6-7],且愈发追求鞋跟高度偏高的高跟鞋。穿着高跟鞋会对身体健康造成一定的负面影响,例如踝关节扭伤^[8-9]。研究表明,随着鞋跟高度的增加,健康女性行走过程中踝关节跖屈、内翻角度增加,踝关节外侧稳定性下降,踝外翻力矩增大,关节活动范围减小,更容易引发踝关节扭伤^[10-11]。

平地行走是人类最基本的活动方式^[12]。研究表明,健康人穿着高跟鞋进行平地行走时会发生足背屈、跖屈增加、踝关节活动范围减小、踝关节周围比目鱼肌、胫骨前肌等肌肉活动增加、足弓压力分布改变等^[13],这些变化可能会导致踝扭伤、足部疼

痛和畸形等问题。目前,关于鞋跟高度对健康女性在平地行走时生物力学特征的研究较多。研究发现,5 cm 高跟鞋会增加穿着者下肢肌肉疲劳,使平衡控制能力和功能活动能力下降。但针对 CAI 女性在不同鞋跟高度情况下平地行走时足着地前后踝关节的运动控制生物力学特征尚不明确,5 cm 以下鞋跟高度是否适用于 CAI 女性尚未可知,有待于深入研究。

本文探讨了鞋跟高度对于 CAI 人群在平地行走过程中足着地早期踝关节运动学与动力学指标的影响,为 CAI 人群踝关节扭伤预防及合适鞋跟高度选择提供一定的数据支持。研究假设:① 与健康组相比,CAI 组穿着高跟鞋行走时足着地早期踝关节内翻、跖屈峰值角度以及内翻峰值角速度等显著增大,踝关节损伤风险增高。② 随着鞋跟高度增加,CAI 女性平地行走过程中足着地早期的踝关节运动控制能力降低。

1 研究方法

1.1 研究对象

应用 G*Power 3.1 软件进行样本量计算,选择双因素重复测量方差分析方法(two-way repeated measures ANOVA)进行统计分析,设定统计功效为 0.8^[14],显著性水平为 0.05,根据预实验结果计算出效应量为 0.20,得出实验所需最小样本量为 36 人。最终招募了 40 名受试者,包括健康组和 CAI 组各 20 名。两组人群共同纳入标准为:

① 18~25岁健康女性;② 鞋码37~39码;③ BMI为18.5~23.9 kg/m²;④ 每周高跟鞋穿着次数少于2次,每次低于8 h。此外,CAI人群均由专业骨科医生临床确诊,且符合本研究的纳入和排除标准,其纳入标准为:① 至少有1次严重的踝关节扭伤,最初扭伤发生在研究前至少12个月;② 有脚踝感觉不稳定的病史,在过去6个月内至少发生过两次;③ Cumberland Ankle 不稳定性工具(CAIT)得分<24,脚踝能力测量(FAAM)日常生活活动(ADL)子量表得分<90%,FAAM运动子量表评分<80%。CAI人群排除标准为:① 既往有下肢肌肉骨骼结构手术史;② 下肢任一体有骨折史,需要重新调整;③ 过去3个月内下肢其他关节肌肉骨骼结构的急性损伤。所有受试者均自愿参与本实验,在测试前48 h内未长时间行走或未做过剧烈运动,并在测试前签署知情同意书。本研究获得了山东体育学院伦理委员会的批准(2023011)。受试者信息如表1所示。

表1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

| 参数 | 健康组 | CAI组 | P |
|---------------------------|------------|------------|-------|
| 年龄/岁 | 21.26±0.29 | 20.36±0.36 | 0.200 |
| 身高/m | 1.63±1.07 | 1.65±1.26 | 0.497 |
| 体质量/kg | 54.33±1.51 | 56.73±1.60 | 0.458 |
| BMI/(kg·m ⁻²) | 20.62±0.37 | 21.05±0.33 | 0.721 |

1.2 仪器设备

1.2.1 Vicon 红外线运动捕捉系统 采用 Vicon 三维红外线运动捕捉系统(Oxford Metrics 公司,英国)进行运动学数据采集,采集频率为100 Hz(见图1)。

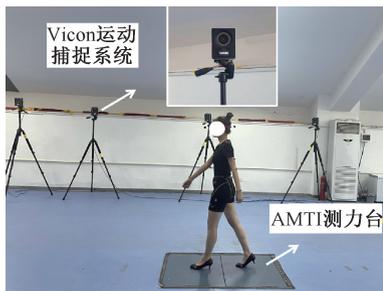


图1 Vicon 运动捕捉系统和 AMTI 三维测力台

Fig. 1 Vicon motion capture system and AMTI three-dimensional force platform

1.2.2 AMTI 测力板 采用 AMTI 三维测力台

(Advanced Mechanical Technology 公司,美国)进行静态标定以及动力学数据采集,采集频率1 kHz(见图1)。

1.2.3 高跟鞋 选用同一制造商生产的高跟鞋,鞋跟高度分别为平跟1 cm、低跟3 cm、中跟5 cm和高跟7 cm。除平跟1 cm外,其余3种均为细跟高跟鞋,鞋跟底面积为14 mm×13 mm。每只鞋的材质均相同(见图2)。



图2 实验用鞋

Fig. 2 Experimental shoes

1.3 测试流程

受试者在实验开始前换上统一的实验紧身衣物和平底鞋,并进行形态学测试和优势腿测试。根据 Visual 3D 人体建模要求,测试人员共粘贴43个反光标志球在受试者的头部、躯干、上下肢和足部^[15]。受试者随机分别穿着4种高度的高跟鞋进行平地行走,在正式测试前进行3次行走练习,熟悉实验流程。首先进行静态标定,适当休息后要求受试者站在距离测力台正前方约2 m远处,听从实验人员“开始”口令后以自然步速行走,行走过程中保持正常自然姿态、双手自然摆动、抬头挺胸,双眼平视前方,分别采集3次行走完整过程。每次测试之后休息1 min,每种鞋况下采3次有效数据,1次有效的数据为运动学、动力学数据采集完整有效,无反光球脱落、无行走中途停顿等影响数据有效性的现象。

采用红外线运动捕捉系统采集受试者上、下肢、躯干和骨盆的43个反光标志点在平地行走过程中的三维坐标时间序列。使用运动捕捉系统和测力台同步采集受试者行走过程中足着地前后200 ms的运动学和动力学数据。

1.4 数据处理

应用 Vicon Nexus 软件对采集到的原始运动学数据进行标记点的命名、建模、截取和删补处理,并将同步采集的动力学数据导入 Visual 3D 软件进行建模、滤波、标准化等处理,采用 Butterworth 四阶低通滤波器分别对原始运动学和动力学进行6 Hz^[16]与50 Hz^[17]滤波平滑。动作周期以时间进行标准化处理,动力学指标进行体质量标准化处理。实验测

试选取踝关节在足着地前后 200 ms 内的运动学和动力学数据。

1.5 测试指标

(1) 运动学指标:踝关节在足着地前后 200 ms 内的矢状面、冠状面、水平面的峰值角度、峰值角速度。

(2) 动力学指标:踝关节在足着地前后 200 ms 内的矢状面、冠状面、水平面的峰值力矩,以体质量进行标准化处理,单位为 $N \cdot m/kg$ 。

1.6 统计学分析

采用 SPSS 27.0 对实验数据进行统计学分析,数据均以(平均数 \pm 标准差)表示。使用 Shapiro-Wilk 检验验证数据的正态性,若数据不符合正态分布,使用非参数检验;若数据符合正态分布,使用独立样本 t 检验分析两组组间人口统计学数据,使用双因素重复测量方差分析检测各项指标在高跟鞋穿着人群和鞋跟高度之间是否存在主效应与交互效应,如果二者存在显著的交互效应,进一步进行 Bonferroni 调整的事后分析,显著性水平为 0.05。

2 研究结果

2.1 两组受试者平地行走时踝关节运动学测试结果

两组人群穿着不同高度的高跟鞋在平地行走过程中足着地前后 200 ms 内踝的内翻峰值角速度以及内翻峰值角度存在显著的组别 \times 高度交互效应。经事后检验结果显示,与鞋跟 1 cm 相比,健康组穿着 5 cm($P=0.002$)、7 cm($P=0.002$)高跟鞋行走时在足着地前后 200 ms 内翻峰值角速度显著较大;穿着 1 cm 与 5 cm($P=0.018$)、7 cm($P<0.001$)高跟鞋行走时内翻峰值角度有显著性差异。与鞋跟 1 cm 相比,CAI 组穿着 5 cm($P=0.002$)、7 cm($P=0.002$)高跟鞋行走时在足着地前后 200 ms 内翻峰值角速度显著较大;穿着 1 cm 与 3 cm($P<0.001$)、5 cm($P<0.001$)、7 cm($P<0.001$)高跟鞋行走时内翻峰值角度有显著性差异;与健康组相比,CAI 组在穿着 3 cm($P=0.001$)高跟鞋行走时内翻峰值角度显著较大,在穿着 5 cm($P=0.05$)高跟鞋行走时内翻峰值角速度显著较大(见图 3)。

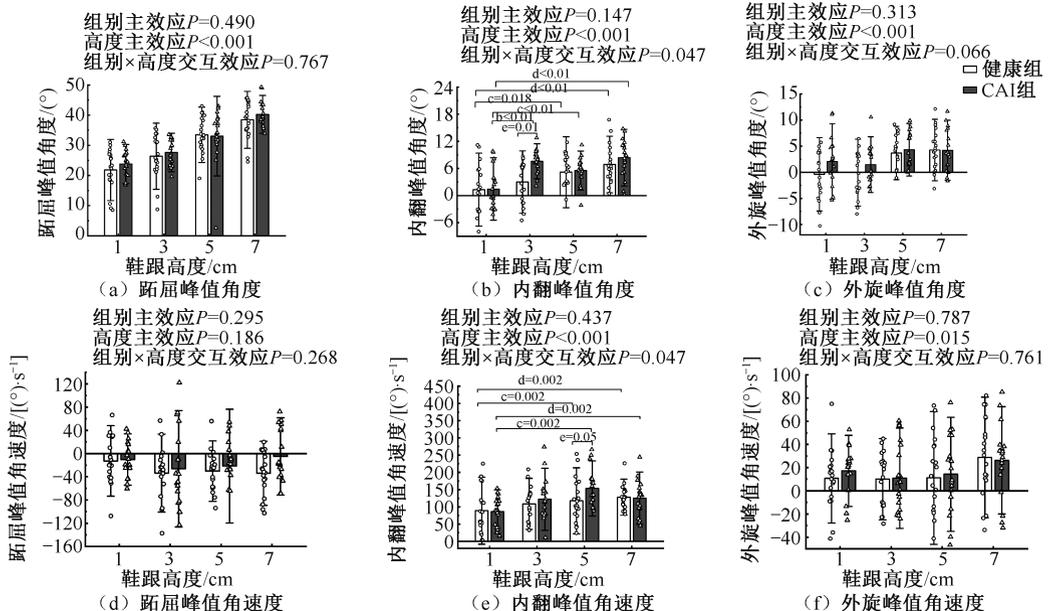


图 3 CAI 组与健康组穿着不同鞋跟高度高跟鞋行走着地前后 200 ms 运动学指标对比

Fig. 3 Comparison of kinematic indicators between the CAI group and the healthy group wearing high-heeled shoes with different heel heights during walking within 200 ms before and after foot contact (a) Peak angle of plantarflexion, (b) Peak angle of inversion, (c) Peak angle of external rotation, (d) Peak angular velocity of plantarflexion, (e) Peak angular velocity of inversion, (f) Peak angular velocity of external rotation
 注:a 表示与 1 cm 相比组内差异具有显著性;b 表示与 3 cm 相比组内差异具有显著性;c 表示与 5 cm 相比组内差异具有显著性;d 表示与 7 cm 相比组内差异具有显著性;e 表示健康组与 CAI 组相比组间具有显著差异性。

在足着地前后 200 ms 内的跖屈峰值角度 ($P < 0.001$)、外旋峰值角度 ($P < 0.001$)、外旋峰值

角速度 ($P < 0.001$) 存在显著的高度主效应 (见图 4)。

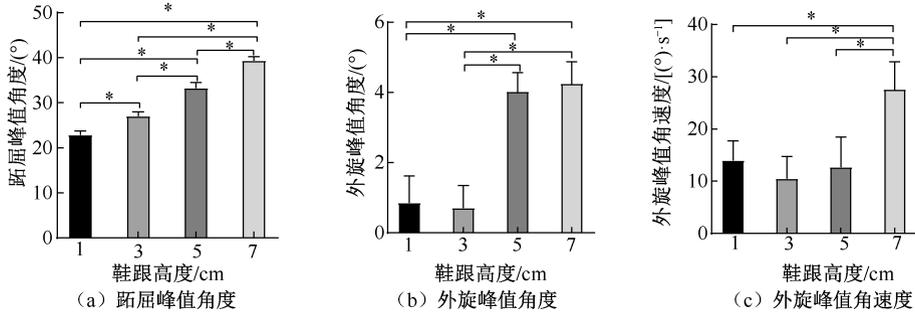


图 4 不同鞋跟高度主效应对比

Fig. 4 Comparison of main effects for shoes with different heel heights (a) Peak angle of plantar flexion, (b) Peak angle of external rotation, (c) Peak angular velocity of external rotation

注: * $P < 0.05$ 。

2.2 两组受试者平地行走时踝关节动力学测试结果

两组受试者在着地期间的各平面峰值力矩无

显著的交互效应。其中,跖屈峰值力矩具有显著的高度主效应 ($P = 0.048$),外翻峰值力矩具有显著的组别主效应 ($P < 0.001$),见图 5。

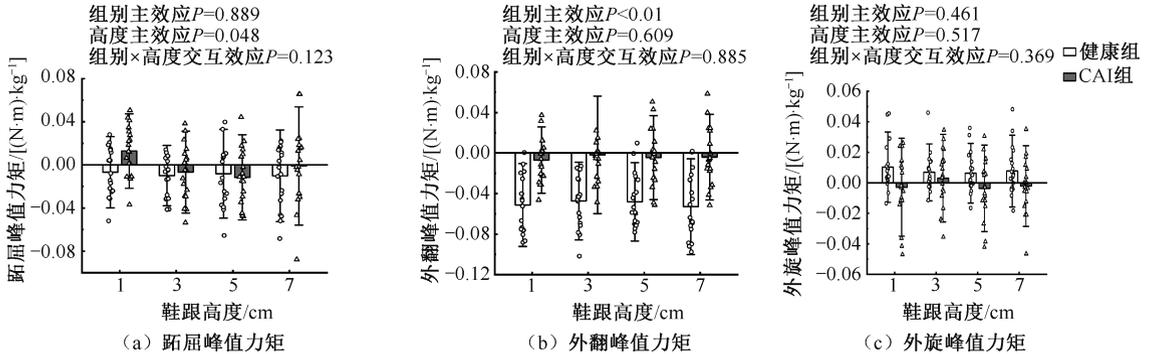


图 5 CAI 组与健康组穿着不同鞋跟高度高跟鞋行走地前后 200ms 动力学测试指标对比

Fig. 5 Comparison of dynamic test indicators between the CAI group and the healthy group wearing high-heeled shoes with different heel heights during walking within 200 ms before and after foot contact (a) Peak moment of plantarflexion, (b) Peak moment of external inversion, (c) Peak moment of external rotation

注: a 表示与 1 cm 相比组内差异具有显著性; b 表示与 3 cm 相比组内差异具有显著性; c 表示与 5 cm 相比组内差异具有显著性; d 表示与 7 cm 相比组内差异具有显著性; e 表示健康组与 CAI 组相比组间具有显著差异性。

3 讨论

本文发现,与健康组相比,CAI 组穿着 3 cm 高跟鞋时在足着地前后 200 ms 内的踝内翻峰值角度显著较大,反映了在步态周期的早期承重阶段 CAI 人群踝关节的运动控制能力的下降,这与前人研究结果相似^[18-19],支持本研究的第 1 个假设。本文结果显示,与鞋跟 1 cm 相比,健康组在穿着 5 cm 及以上高度高跟鞋行走时踝关节内翻峰值角度显著较

大,而 CAI 组在穿着 3 cm 及以上高度高跟鞋行走时就表现出显著较大的内翻峰值角度,这可能是因为 CAI 人群在步态过程中的神经肌肉控制不足,平衡能力下降及小腿内外侧肌肉力量不均衡^[10]等。腓骨长肌是限制踝关节内翻主要肌肉之一。先前多数研究表明,CAI 人群在运动中会出现腓骨长肌激活时间延迟^[20]、激活程度下降^[21-22]等特点,从而引起踝关节控制能力下降,故表现出在穿着高跟鞋行走中内翻峰值角度增大,这与 Hiller 等^[23]研究结果

相似。Hiller 等^[23] 研究认为,与 CAI 人群相关的感觉运动系统的破坏可能导致内翻运动预测减少或腓骨肌运动反应延迟,故在足着地前和承重期间,踝关节会表现出内翻角度增加。本文结果表明,与健康人相比,CAI 人群的踝关节运动控制能力较为薄弱,CAI 人群在穿着高跟鞋行走时进一步增加了踝关节出现内翻扭伤的风险。

此外,本文发现,在穿着高跟鞋行走足着地前后 200 ms 内,与鞋跟 1 cm 相比,CAI 组在穿着 5 cm 高跟鞋时踝关节内翻峰值角速度显著较大,而健康组在穿着 7 cm 高跟鞋时才表现出踝关节内翻峰值角速度的显著增大。这可能是两种人群踝关节稳定性存在一定的差异所导致^[24]。踝关节的内翻角度和内翻角速度是评价踝关节内翻损伤的重要指标^[18]。先前研究表明,CAI 人群步态过程中会出现对关节位置和运动感知能力减弱,踝背屈角度减小、跖屈和内翻角度增加等变化^[10,25],而穿着高跟鞋后内翻角速度的增大会进一步导致踝内外方向的运动难以更好控制,脚与地面的接触时间减少,稳定性降低,这可能会增加踝关节周围肌肉的需求和负荷,使踝关节更容易疲劳和损伤。Kim 等^[26] 研究显示,踝关节的控制依赖于胫骨前肌和腓肠肌,CAI 人群存在腓骨长肌激活延迟、胫骨前肌和比目鱼肌肌力下降等肌肉异常活动及肌肉共收缩失衡等均会导致踝关节不稳。与健康组相比,CAI 组在穿着 5 cm 高跟鞋时踝内翻峰值角速度显著较大。该结果也表明 CAI 人群穿着高跟鞋时,随跟高增加,尤其在跟高 5 cm 以上时,踝关节的稳定性和控制能力下降,进一步增加了踝扭伤的风险。而内翻角度及内翻角速度的增大也意味着韧带将承受更大的拉力^[18],更容易发生损伤。

本文结果显示,两组人群穿着高跟鞋行走时在足着地前后 200 ms 内,与平跟鞋相比,鞋跟越高,踝内翻、跖屈峰值角度越大,这与 Barkema 等^[27] 和 Hong 等^[28] 研究结果相似,部分支持了本研究的第 2 个假设。本文推测,两组人群在穿着高跟鞋行走时踝处于被动跖屈的状态,下胫腓韧带松弛且踝关节中心向足的前外侧偏移,足负重变大,受力不均且此时腓肠肌内外不平衡,肌力不对称等使踝处于不稳定状态^[29],导致踝内翻、跖

屈峰值角度增大,并且随鞋跟高度增加而增大。Hong 等^[28] 研究结果与本文结果相似,即健康人群穿着高跟鞋时,随跟高增加,跖屈、内翻角度不断增加,这也进一步增加了腿部和下背部肌肉负荷,损害足部的稳定性,增加踝扭伤的风险^[30-31]。有研究发现,在足着地、离地时刻,高跟鞋对腓肠肌长度有所限制,极易产生并加重疲劳。而随着跟高增加,腓肠肌内外侧、股外侧肌和胫骨前肌的紧张程度继续增大,腓肠肌肌束缩短,容易导致跟腱刚度增加,进一步限制了踝关节活动范围。穿着高跟鞋可能会使踝关节处于更跖屈和旋后的位置,从而限制其活动范围,影响其姿势控制策略。然而,Simonsen 等^[32] 研究显示,穿高跟鞋时踝关节跖屈力矩减小,与本文结果不一致,可能是因为其采集的是在跑步机上行走过程中跖屈力矩的变化,而本文只选取了在平地行走时着地前后 200 ms 的数据进行研究。此外,两组人群穿着高跟鞋时,随跟高增加,踝关节外翻峰值力矩也出现增大趋势,推测原因是跟高增加,足底过度屈曲和内翻,外侧韧带和肌肉负荷增加,从而使得踝关节外翻力矩增大来抵抗踝关节内翻的力量,保持踝关节平衡和增加踝关节稳定性,降低因踝关节内翻导致的扭伤风险。

本研究存在一定局限性:① 只纳入年轻女性作为受试人群,未来可以对不同年龄段的 CAI 女性进行研究;② 只选取 4 种高度的高跟鞋进行测试,未来可选取鞋跟高度不同、鞋跟粗细不同等多类型的高跟鞋;③ 由于肌肉活动会影响关节的运动控制,未来可针对 CAI 人群在穿着高跟鞋着地前后或整个行走过程中踝关节相关肌肉的活动进行研究,为 CAI 人群提供更加全面的建议与指导。

4 结论

随着鞋跟高度的增加,青年女性行走足着地过程中踝关节表现出内翻、外旋、跖屈程度增大,踝关节稳定性降低,损伤风险增大。5 cm 鞋跟高度可引起健康女性行走着地过程中踝关节内翻角速度与角度的增大,而 3 cm 鞋跟高度即可引起 CAI 女性内翻角度的增大。相比于健康女性,CAI 女性行走时尽管通过增大踝关节外翻力矩的神经肌肉控制,但

在穿着3、5 cm高跟鞋时仍表现出踝关节内翻角度、角速度的增大,内翻扭伤风险增大。因此,建议健康女性与CAI女性在日常生活中分别选择穿着5、3 cm以下的高跟鞋。

利益冲突声明: 无。

作者贡献声明: 孙威负责试验设计、论文修改;赵春燕、闫晓芹、程静静负责试验实施与数据分析处理;赵春燕负责论文撰写;王疆娜、孙威负责数据和论文校对。

参考文献:

- [1] YEUNG MS, CHAN KM, SO CH, *et al.* An epidemiological survey on ankle sprain [J]. *Br J Sports Med*, 1994, 28(2): 112-116.
- [2] 黄留旖, 闫兆奇, 王星月, 等. 慢性踝关节不稳对膝关节肌群的影响[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(5): 996-1002.
HUANG LY, YAN ZQ, WANG XY, *et al.* The effect of chronic ankle instability on knee joint muscles [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(5): 996-1002.
- [3] LIN YC, FOK LA, SCHACHE AG, *et al.* Muscle coordination of support, progression and balance during stair ambulation [J]. *J Biomech*, 2015, 48(2): 340-347.
- [4] MONAGHAN K, DELAHUNT E, CAULFIELD B. Ankle function during gait in patients with chronic ankle instability compared to controls [J]. *Clin Biomech*, 2006, 21(2): 168-174.
- [5] ZHENG H, TIAN F, SUN W, *et al.* Neuromuscular electrical stimulation improves frontal ankle motor control in individuals with chronic ankle instability during drop-landing [J/OL]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2024, doi: 10.1097/PHM.0000000000002468.
- [6] 张孟佳. 两种着高跟鞋上楼梯行走方式对青年女性步态影响的生物力学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [7] TAKATA Y, UCHIYAMA E, KIMURA K, *et al.* Wearing high-heeled shoes on a side slope makes standing balance unstable [J]. *J Bodyw Mov Ther*, 2023(33): 171-175.
- [8] WILLIAMS CM, HAINES TP. An exploration of emergency department presentations related to high heel footwear in Victoria, Australia, 2006–2010 [J]. *J Foot Ankle Res*, 2014, 7(1): 4.
- [9] MOORE JX, LAMBERT B, JENKINS GP, *et al.* Epidemiology of high-heel shoe injuries in U. S. women: 2002 to 2012 [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2015, 54(4): 615-619.
- [10] YAMADA-YANAGAWA A, SASAGAWA S, NAKAZAWA K, *et al.* Effects of occasional and habitual wearing of high-heeled shoes on static balance in young women [J]. *Front Sports Act Living*, 2022(4): 760991.
- [11] 时会娟, 吴肖洁, 李翰君, 等. 鞋跟高度对青年女性下楼梯步态的影响[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(3): 256-263.
SHI HJ, WU XJ, LI HJ, *et al.* The influence of heel height on gait of young females during stair descent [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(3): 256-263.
- [12] 周祥松, 张万松. 鞋跟高度对足迹动、静态特征影响的研究 [J]. *中国司法鉴定*, 2019(4): 67-73.
- [13] ZENG Z, LIU Y, HU X, *et al.* Effects of high-heeled shoes on lower extremity biomechanics and balance in females: A systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Public Health*, 2023, 23(1): 726.
- [14] 汤运启, 李灵君, 张移帆, 等. 极筒鞋对后跟着地跑者足踝生物力学的影响 [J]. *皮革科学与工程*, 2022, 32(5): 57-62.
- [15] 沈培鑫. PNF干预对老年膝关节炎患者下楼梯过程中疼痛、下肢关节活动度及力学特征的影响 [D]. 济南: 山东体育学院, 2019.
- [16] SHEEHAN RC, GOTTSCHALL JS. At similar angles, slope walking has a greater fall risk than stair walking [J]. *Appl Ergon*, 2012, 43(3): 473-478.
- [17] MCCRORY JL, CHAMBERS AJ, DAFTARY A, *et al.* Ground reaction forces during stair locomotion in pregnancy [J]. *Gait Posture*, 2013, 38(4): 684-690.
- [18] DELAHUNT E, REMUS A. Risk factors for lateral ankle sprains and chronic ankle instability [J]. *J Athl Train*, 2019, 54(6): 611-616.
- [19] DELAHUNT E, MONAGHAN K, CAULFIELD B. Altered neuromuscular control and ankle joint kinematics during walking in subjects with functional instability of the ankle joint [J]. *Am J Sports Med*, 2006, 34(12): 1970-1976.
- [20] JEON HG, LEE SY, PARK SE, *et al.* Ankle instability patients exhibit altered muscle activation of lower extremity and ground reaction force during landing: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Sports Sci Med*, 2021, 20(2): 373-390.
- [21] TRETRILUXANA J, NANBANCHA A, SINSURIN K, *et al.* Neuromuscular control of the ankle during pre-landing in athletes with chronic ankle instability: Insights from statistical parametric mapping and muscle co-contraction analysis [J]. *Phys Ther Sport*, 2021(47): 46-52.
- [22] FONG CM, BLACKBURN JT, NORCROSS MF, *et al.* Ankle-dorsiflexion range of motion and landing biomechanics [J]. *J Athl Train*, 2011, 46(1): 5-10.
- [23] HILLER CE, REFSHAUGE KM, BEARD DJ. Sensorimotor control is impaired in dancers with functional ankle instability [J]. *Am J Sports Med*, 2004, 32(1): 216-223.