

文章编号: 1004-7220(2024)06-1160-08

跑鞋跟掌落差对髌股关节痛跑者髌股关节和跟腱负荷特征的急性影响

顾瑜^{1,2}, 郑志艺³, 曾全寿³, 杨辰⁴, 万祥林^{1,2}

(1. 北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084; 2. 国家体育总局体能训练与身体机能恢复实验室, 北京 100084; 3. 安踏(中国)有限公司, 福建 泉州 362000; 4. 南京体育学院 运动健康学院, 南京 210114)

摘要:目的 明确跑鞋跟掌落差(5,0,-11 mm)对髌股关节痛跑者跑步时髌股关节和跟腱负荷特征的急性影响。方法 16名髌股关节痛跑者穿着不同跟掌落差的跑鞋进行跑步测试,应用红外动作捕捉系统和三维测力台采集体表标志点和地面反作用力数据,基于髌股关节和跟腱生物力学模型计算髌股关节应力、跟腱力等参数。结果 与正跟鞋相比,穿着负跟鞋在39%~47%支撑期髌股关节应力($P<0.001$)、支撑期髌股关节最大应力及冲量($P<0.05$)较小,但在12%~46%支撑期跟腱力($P<0.001$)及支撑期跟腱力冲量较大($P=0.001$)。与零跟鞋相比,穿着负跟鞋在12%~31%支撑期跟腱力($P<0.001$)及支撑期跟腱力冲量($P=0.023$)较大。结论 与正跟鞋相比,髌股关节痛跑者穿着负跟鞋跑步时髌股关节应力和冲量较小,可能可以限制髌股关节痛的进一步发展;与零跟鞋和正跟鞋相比,穿着负跟鞋跑步时跟腱力和跟腱力冲量较大,可能增加跟腱损伤风险。建议髌股关节痛跑者在更换负跟鞋前先进行适应性训练,从而在不增加跟腱损伤风险的同时限制髌股关节痛的进一步发展。

关键词: 跑鞋跟掌落差; 髌股关节痛; 髌股关节应力; 跟腱力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.06.021

Acute Effects of Heel-to-Toe Drop of Running Shoes on Patellofemoral Joint and Achilles Tendon Loading in Runners with Patellofemoral Pain

GU Yu^{1,2}, ZHENG Zhiyi³, ZENG Quanshou³, YANG Chen⁴, WAN Xianglin^{1,2}

(1. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 10084, China; 2. Key Laboratory for Performance Training & Recovery of General Administration of Sport, Beijing 10084, China; 3. ANTA (China) Co., Ltd., Quanzhou 362000, Fujian, China; 4. School of Sports and Health, Nanjing Sport Institute, Nanjing 210014, China)

Abstract: Objective To determine the acute effects of heel-to-toe drops (5,0,-11 mm) of running shoes on the loading of the patellofemoral joint and Achilles tendon (AT) in runners with patellofemoral pain (PFP) during running. **Methods** Sixteen runners with PFP completed a running test while wearing running shoes with different heel-to-toe drops. The retroreflective markers and ground reaction force were measured using an infrared motion capture system and a three-dimensional force plate. The patellofemoral joint stress (PFJS) and AT force were calculated based on biomechanical models of the patellofemoral joint and AT. **Results** When runners with PFP ran in negative-heel shoes, the PFJS ($P<0.001$) during 39%–47% of the stance phase, maximum PFJS, and

收稿日期: 2024-05-18; 修回日期: 2024-06-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2024TJN007), 安踏(中国)有限公司横向课题(ATETYB202306007)

通信作者: 万祥林, 副教授, E-mail: wanxianglin@bsu.edu.cn

cumulative PFJS ($P<0.05$) during the stance phase were lower than those in positive-heel shoes. Meanwhile, the AT force ($P<0.001$) during 12%–46% of the stance phase and cumulative AT force ($P=0.001$) during the stance phase were larger than those in positive-heel shoes. The AT force ($P<0.001$) during 12%–31% of the stance phase and cumulative AT force ($P=0.023$) during the stance phase in negative-heel shoes were higher than those in zero-heel shoes. **Conclusions** Compared with runners with positive-heel shoes, runners with PFP running in negative-heel shoes had decreased PFJS and cumulative PFJS. This may potentially reduce the risk of further development of PFP. However, compared with zero- and positive-heel shoes, running in negative-heel shoes increases the AT force and cumulative AT force. This may increase the risk of AT injury. Runners with PFP are recommended to undergo acclimatization before shifting to negative-heel shoes. This would limit further progression of PFP without increasing the risk of AT injury.

Key words: heel-to-toe drop; patellofemoral pain; patellofemoral joint stress; achilles tendon force

跑步作为最流行的大众健身方式之一,具有改善心血管功能、提高心肺耐力、减肥塑形的作用,但也存在较高的损伤风险,可能引起髌股关节痛(patellofemoral pain, PFP)及跟腱炎等相关损伤^[1]。PFP作为最常见的跑步损伤之一,在跑步人群中患病率达16.7%^[2],其会限制患者的体力活动,且长期的PFP还可能会导致髌股关节炎,从而严重影响生活质量^[3]。因此,采取有效的措施预防和治疗PFP至关重要。目前,临床上多采用髌骨贴扎和支具、足部矫形器等保守方法进行干预,但效果仍缺乏有力的证据支持^[4]。在一项针对52个随机对照试验共2 667名PFP患者的调查中发现,60%的临床干预结果不显著^[5]。

研究表明,髌股关节应力(patellofemoral joint stress, PFJS)增大是导致PFP发生的主要原因^[6]。因此,明确能够有效降低PFJS的方法,成为PFP预防和治疗的关键。研究发现,跑步着地方式和跑鞋跟掌落差(heel-to-toe drop, HTD)等因素可能会影响PFJS^[7-10]。习惯后足着地PFP跑者转换跑姿为前足着地时,PFJS降低,疼痛有所缓解^[10]。相比于高HTD跑鞋,习惯后足着地的健康人群在穿着低HTD跑鞋跑步时,着地方式有向前足过渡的趋势,支撑期最大PFJS和应力冲量较小,从而可能会降低PFP发生的风险^[7,9,11]。然而,有研究发现,健康人群转换跑姿为前足着地时,最大跟腱力较大^[12];且在穿着低HTD跑鞋跑步时,会导致更大的跟腱负荷,可能会增加跑者跟腱损伤的风险^[13]。而跟腱损伤会制约跑者继续参加跑步运动,且个体终身患病风险达52%^[14]。由于PFP患者和健康人群跑步时下肢生物

力学特征存在明显差异^[15-16],目前尚不清楚HTD如何影响PFP跑者髌股关节和跟腱负荷的特征。

本文通过明确HTD对PFP跑者跑步时髌股关节和跟腱负荷特征的影响,探讨低HTD跑鞋对缓解PFP症状及对跟腱损伤的潜在影响,从而为PFP跑者选鞋提供参考。本研究假设习惯后足着地的PFP跑者穿着低HTD鞋跑步时会导致:①足地角(着地瞬间足尖和足跟点连线与地面的夹角)降低;②支撑期PFJS和冲量降低;③支撑期跟腱力和冲量增大。

1 研究对象和方法

1.1 受试者

招募16名男性PFP跑步爱好者,年龄(20.6 ± 2.0)岁,身高(1.76 ± 0.05)m,体质量(68.89 ± 4.88)kg。纳入标准为:①慢跑习惯着地方式为跟-尖式着地;②除跑步外,同时在下蹲、上/下楼梯、久坐、跳跃和抗阻伸膝中,至少有1个动作出现过髌周或髌后的疼痛;③疼痛等级至少达到10cm视觉模拟量表评分的3分以上(0代表无痛,10代表最大疼痛)^[17];④疼痛3个月以上,且不是由直接创伤造成;⑤跑步经历2年以上;⑥周跑量超过10km。排除标准为:①髌骨半脱位或脱位;②存在膝关节炎或肌腱、韧带、半月板等软组织损伤;③有下肢手术史。

本研究经北京体育大学运动科学实验伦理委员会批准(2023095H),所有参与该项研究的受试者均于测试前签署知情同意书。

1.2 测试用鞋

由专业鞋厂定制HTD为5、0、-11mm的跑鞋

(见图 1)。除 HTD、颜色外,跑鞋其余部分的材料和结构完全一致。其中,正、零和负跟鞋分别指高、中和低 HTD 跑鞋。鞋码为 41 码,鞋中底材料为聚氨酯甲酸酯(polyurethane, PU),密度为 0.10 g/cm^3 ,邵氏硬度为 (42 ± 3) 度。



图 1 测试用鞋

Fig. 1 Test shoes (a) Positive-heel shoes, (b) Zero-heel shoes, (c) Negative-heel shoes

注:正跟鞋、零跟鞋和负跟鞋 HTD 分别为 5、0、-11 mm。

1.3 数据采集与处理

受试者着紧身衣裤充分热身,由同一名实验人员按照 Helen Hayes 方案在下肢粘贴反光标志点^[18]。在进行每双跑鞋测试前,均穿着测试鞋进行 5 min 慢跑,以充分适应跑鞋及测试要求。且为避免疲劳因素对实验结果产生影响,要求受试者每次跑步之间充分休息。通过 Kistler 9287CA 三维测力台(1 kHz, Kistler 公司,瑞士)、Qualisys Oqus700+ 8 镜头红外高速运动捕捉系统(200 Hz, Qualisys 公司,瑞士)同步采集地面反作用力(ground reaction force, GRF)及体表标志点坐标。跑步测试时,起跑位置距离测力台直线距离 10~20 m,通过 Smartspeed 便携式测速系统(Fusion Sport 公司,澳大利亚)监控跑者通过测力台的速度在 $(4 \pm 0.3) \text{ m/s}$ ^[9,17]。在规定跑速下,受试者以正常步态、无任何步伐调整,并以患侧足着在台面上视为 1 次有效测试。其中,双侧患者选择主观感受较疼痛的一侧进行测试^[19]。按随机顺序完成 3 双鞋的测试,每双鞋采集 3 次有效数据,取 3 次结果的平均值进行后续的数据分析。

所有标志点的三维坐标采用 Butterworth 低通滤波法进行平滑,截断频率为 13.3 Hz^[20]。根据标志点坐标建立骨盆、大腿、小腿及足坐标系^[7]。采用欧拉角及逆动力学法^[21]计算踝、膝关节的矢状面角度和关节净力矩。力矩除以受试者身高(body height, BH)和体重(body weight, BW)的乘积进行标准化,关节力、跟腱力和股四头肌肌力除以受试者

体重进行标准化。跑步支撑相定义为一侧足着地至离地的时间。足着地或离地时刻定义为首次垂直 GRF > 10 N 或垂直 GRF < 10 N 的时刻。

根据足地角确定着地方式。其中,足地角 > 8° 为后足着地, $-1.6^\circ < \text{足地角} < 8^\circ$ 为中足着地,足地角 < -1.6° 为前足着地^[22]。

根据髌股关节^[23]和跟腱生物力学模型^[24]计算 PFJS、跟腱力等指标。PFJS 冲量和跟腱力冲量通过梯形法计算 PFJS 和跟腱力对时间的积分获得。

采用 3 次样条插值法对踝、膝关节矢状面角度和力矩、PFJS 和接触力,以及跟腱力和力臂按支撑相进行归一化处理。

1.4 统计学分析

所有参数均用(平均值 ± 标准差)表示。采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene's 检验分析定量资料的正态分布和方差齐性。若满足正态分布和方差齐性则采用单因素重复测量方差分析对比 HTD 对各指标的影响,若不满足正态分布或方差齐性则采用 Friedman 检验。采用统计参数映射法(statistical parameter mapping, SPM)分析 HTD 对支撑期 PFJS 和跟腱力-时间序列的影响。事后两两均比较采用 Bonferroni 法检验。显著性水平定为一类误差概率不大于 0.05。统计分析使用 SPSS 20.0(IBM 公司,美国)完成。

2 结果

2.1 对着地时刻各指标的影响

方差分析和 Friedman 检验结果显示,HTD 对足地角($P = 0.047$)、着地时刻踝关节屈伸角度($P < 0.001$)和膝关节屈曲角度($P = 0.028$)有显著影响。后续检验结果表明,穿着负跟鞋时足地角小于正跟鞋($P = 0.040$)。并且两名 PFP 跑者穿着负跟鞋时足地角 < -1.6°。穿着负跟鞋时的着地时刻踝关节跖屈角度大于零跟鞋($P = 0.008$)和正跟鞋($P < 0.001$),着地时刻屈膝角度大于正跟鞋($P = 0.011$)。但穿着零跟鞋时的着地时刻踝关节背屈角度小于正跟鞋($P < 0.001$),见图 2。

2.2 对髌股关节力学参数的影响

穿着不同 HTD 鞋跑步的支撑期内,膝关节矢状面角度及力矩、髌股关节接触力及应力整体表现为随时间的增加先增大后减小的趋势,见图 3。

方差分析和 Friedman 检验结果显示,HTD 对最

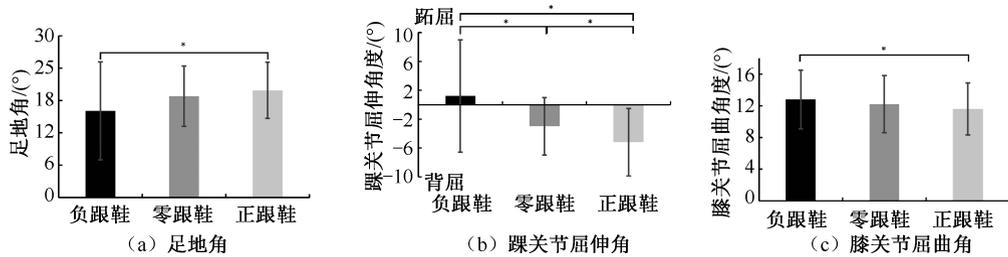


图2 穿着不同 HTD 鞋跑步时着地瞬间各指标比较 (* $P < 0.05$)

Fig. 2 Comparison of the parameters at the time of landing in shoes with different heel-to-toe drops

(a) Foot inclination angle, (b) Ankle angle at sagittal plane, (c) Knee flexion angle

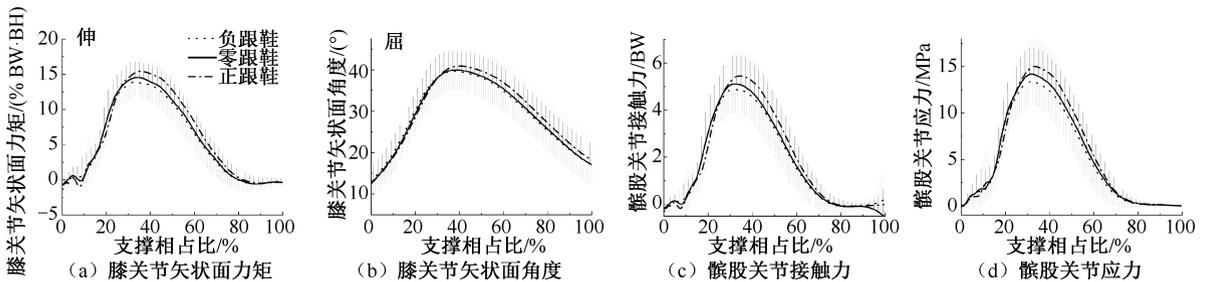


图3 穿着不同 HTD 鞋跑步时膝关节及髌股关节相关参数曲线

Fig. 3 Curves of knee and patellofemoral joint related parameters during running in shoes with different heel-to-toe drops (a) Knee moment at sagittal plane, (b) Knee angles at sagittal plane, (c) Patellofemoral joint reaction force, (d) Patellofemoral joint stress

大 PFJS ($P = 0.005$)、PFJS 冲量 ($P = 0.039$)、最大应力时刻髌股关节接触力 ($P = 0.007$)、股四头肌肌力 ($P = 0.004$)、伸膝力矩 ($P = 0.002$) 有显著影响。后续检验结果表明,穿着负跟鞋时最大 PFJS ($P = 0.017$) 和冲量 ($P = 0.042$),最大应力时刻髌股

关节接触力 ($P = 0.021$)、股四头肌肌力 ($P = 0.013$) 和伸膝力矩 ($P = 0.008$) 小于正跟鞋。但 HTD 对支撑期时间 ($P = 0.850$)、最大应力时刻髌股关节接触面积、股四头肌力臂和屈膝角度无显著影响 ($P = 0.444, P = 0.646, P = 0.646$),见表 1。

表 1 穿着不同 HTD 鞋跑步时髌股关节生物力学参数比较

Tab. 1 Comparison of biomechanical parameters of patellofemoral joints during running in shoes with different heel-to-toe drops

参数	负跟鞋	零跟鞋	正跟鞋	P
最大 PFJS/MPa	14.44±2.54 ^b	15.01±2.95	15.84±2.94	0.005
PFJS 冲量/MPa·s	1.23±0.32 ^b	1.28±0.39	1.34±0.29	0.039
支撑期时间/s	0.22±0.01	0.22±0.02	0.22±0.01	0.850
最大应力时刻髌股关节接触力/BW	5.10±1.04 ^b	5.29±1.23	5.60±1.09	0.007
最大应力时刻髌股关节接触面积/mm ²	236.24±8.24	235.38±9.00	237.12±7.51	0.444
最大应力时刻股四头肌肌力/BW	6.13±1.09 ^b	6.37±1.28	6.70±1.14	0.004
最大应力时刻股四头肌力臂/cm	4.15±0.16	4.16±0.18	4.14±0.16	0.646
最大应力时刻屈膝角度/(°)	40.2±4.4	39.96±5.1	40.7±4.4	0.646
最大应力时刻伸膝力矩/%BW·BH	14.18±2.30 ^b	14.74±2.63	15.46±2.39	0.002

注: ^a $P < 0.05$,与零跟鞋相比; ^b $P < 0.05$,与正跟鞋相比。

SPM 结果显示,在 34%~52% 支撑期,HTD 对 PFJS 有显著影响 ($P < 0.001$)。后续检验结果表明,在 39%~47% 支撑期,穿着负跟鞋跑步时 PFJS 小于正跟鞋 ($P < 0.001$),见图 4。

2.3 对跟腱力学参数的影响

穿着不同 HTD 鞋跑步的支撑期内,踝关节矢状面力矩和跟腱力整体表现为随时间的增加先增大后减小的趋势,踝关节矢状面角度和跟腱力臂表现

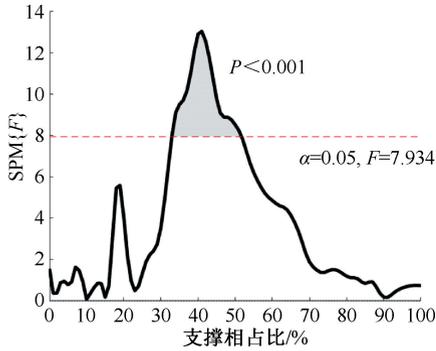


图4 穿着不同HTD鞋跑步时PFJS的SPM检验结果
Fig. 4 SPM test results of PFJS during running in shoes with different heel-to-toe drops

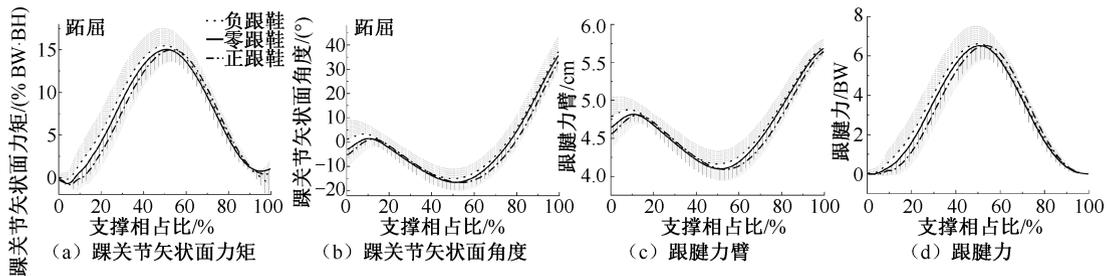


图5 穿着不同HTD鞋跑步时踝关节及跟腱相关参数曲线

Fig. 5 Curves of ankle joint and Achilles tendon related parameters during running in shoes with different heel-to-toe drops (a) Ankle moment at sagittal plane, (b) Ankle angles at sagittal plane, (c) Achilles tendon moment arm, (d) Achilles tendon force

表2 穿着不同HTD鞋跑步时跟腱力学参数比较

Tab. 2 Comparison of biomechanical parameters of Achilles tendon during running in shoes with different heel-to-toe drops

参数	负跟鞋	零跟鞋	正跟鞋	P
最大跟腱力/BW	6.74±0.92	6.64±0.76	6.62±0.73	0.295
跟腱力冲量/BW·s	0.72±0.12 ^{a,b}	0.68±0.09	0.67±0.09	<0.001
最大跟腱力时刻跟腱力臂/cm	4.15±0.17 ^b	4.08±0.15	4.08±0.15	0.005
最大跟腱力时刻踝关节跖屈力矩/%BW·BH	15.73±2.03 ^b	15.26±1.54	15.18±1.41	0.009
最大跟腱力时刻踝关节背屈角度/(°)	15.2±3.9 ^b	16.8±3.3	16.8±3.4	0.004

注:^a $P < 0.05$,与零跟鞋相比;^b $P < 0.05$,与正跟鞋相比。

SPM结果显示,在8%~47%支撑期,HTD对跟腱力有显著影响($P < 0.001$)。后续检验结果表明,在12%~31%支撑期,穿着负跟鞋跑步时跟腱力大于零跟鞋($P < 0.001$);在12%~46%支撑期,穿着负跟鞋跑步时跟腱力大于正跟鞋($P < 0.001$),见图6。

3 讨论

3.1 对着地方式的影响

跑步着地方式可能会影响PFJS和跟腱

为随时间的增加先增大后减小再增大的趋势(见图5)。

方差分析和Friedman检验结果显示,HTD对跟腱力冲量($P < 0.001$),最大跟腱力时刻跟腱力臂($P = 0.005$)、踝关节跖屈力矩($P = 0.009$)和背屈角度($P = 0.004$)有显著影响。后续检验结果表明,穿负跟鞋跑步时跟腱力冲量和最大跟腱力时刻的跟腱力臂、踝关节跖屈力矩大于正跟鞋($P = 0.001$, $P = 0.015$, $P = 0.041$),最大跟腱力时刻踝关节背屈角度小于正跟鞋($P = 0.015$)。且穿负跟鞋跑步时跟腱力冲量大于零跟鞋($P = 0.023$)。但HTD对最大跟腱力($P = 0.295$)无显著影响(见表2)。

力^[8,10,25]。本文结果部分支持穿着低HTD鞋跑步时足地角降低的研究假设。本文发现,与正跟鞋相比,PF跑者穿着负跟鞋跑步时足地角降低了 3.8° 。且有两名受试者穿着负跟鞋跑足地角小于 -1.6° ,转换跑姿为前足着地。有研究表明,与高HTD鞋相比,穿着低HTD鞋跑步时着地位置更靠近前足^[7,11],但直接更换负跟鞋不会导致所有跑者跑步时的着地方式发生转变^[11]。本文推测,这与跑者足踝部肌肉对负跟鞋的适应能力存在个体差异等原因有关。本文结果表明,与未转换跑姿的跑者

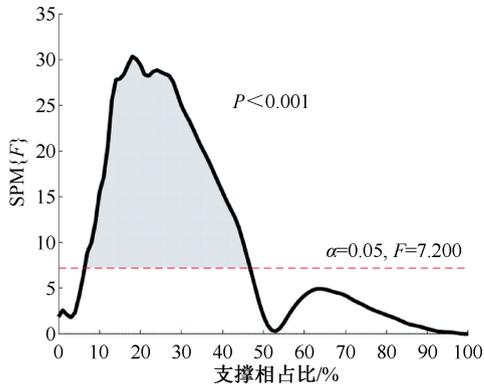


图6 穿着不同HTD鞋跑步时跟腱力的SPM检验结果
Fig.6 SPM test results of Achilles tendon force during running in shoes with different heel-to-toe drops

相比,转换跑姿的跑者在穿着零跟和正跟鞋时足地角较小。该结果提示,转换跑姿的跑者可能具有较强的足踝部肌肉力量,主要通过增加踝关节跖屈角度来适应负跟鞋。而未转换跑姿的跑者主要通过减小踝关节背屈角度和增大屈膝角度来适应负跟鞋。

本文发现,PFJP跑者穿着零跟鞋与负跟及正跟鞋相比,足地角均无显著性差异,提示小幅度改变HTD对足地角的影响不大。

3.2 对髌股关节负荷特征的影响

重复作用在髌股关节处的异常载荷会增大软骨下骨的代谢活动和髌骨含水量,而含水量的提升可能增大髌骨骨内压,进而刺激压敏机械性痛觉感受器而导致疼痛的产生^[26]。研究表明,PFJS过大是PFJP发生的主要原因^[6]。本文发现,PFJP跑者穿着负跟鞋跑步时最大PFJS和冲量小于正跟鞋,且在39%~47%支撑期穿着负跟鞋跑步时PFJS小于正跟鞋,该结果部分支持本研究的第2个假设,提示穿着负跟鞋可能有助于降低PFJP的进一步发展。

髌股关节接触力的增大或接触面积的减小会引起PFJS的增加。本文发现,与正跟鞋相比,穿着负跟鞋跑步时PFJP跑者髌股关节接触力降幅超过8.8%,而髌股关节接触面积变化幅度不明显。因此,PFJP跑者穿着负跟鞋跑步时,髌股关节接触力降低是导致关节应力降低的主要原因。髌股关节接触力是股四头肌肌腱和髌腱共同作用在髌骨上的反作用力,与股四头肌的肌力呈正相关^[6]。本文结果显示,穿着负跟鞋跑步时,最大PFJS时刻股四

头肌肌力小于正跟鞋,该结果与髌股关节接触力的结果相一致。而股四头肌肌力的降低与伸膝力矩减小和其力臂增大有关。本文发现,在穿着负跟鞋跑步时,最大PFJS时刻伸膝力矩小于穿着正跟鞋,而股四头肌力臂无显著变化。该结果表明,PFJP跑者穿着负跟鞋跑步时最大PFJS降低的主要原因是伸膝力矩降低。当穿着负跟鞋跑步时,跑者着地位置更靠近前足,这与后足着地相比有更大的踝关节跖屈角度和活动范围,从而可缓冲更多的地面冲击力,导致伸膝力矩下降^[11]。

最大PFJS反映了支撑期内髌股关节所承受的最大负荷,而PFJS冲量反映了PFJS在整个跑步支撑期时间上的累积效应,其增大源于PFJS和支撑期时间的增大。本文发现,在39%~47%支撑期穿着负跟鞋跑步时PFJS小于正跟鞋,而HTD对支撑期时间无显著影响。因此,PFJS减小可能是导致穿着负跟鞋PFJS冲量减小的原因。

本文结果显示,与负跟鞋及正跟鞋相比,PFJP跑者穿着零跟鞋跑步时PFJS和PFJS冲量均无显著性差异,提示小幅度改变HTD对髌股关节负荷的影响不大。

3.3 对跟腱负荷特征的影响

跟腱是跑步时传递小腿三头肌力的重要结构,也是下肢力及能量储存和释放的关键^[25]。研究表明,造成跑步时跟腱损伤的主要原因是异常张力重复牵拉跟腱,导致其过载后无法完成恢复^[13]。本文发现,与零跟鞋和正跟鞋相比,PFJP跑者穿着负跟鞋跑步时跟腱力冲量较大,但HTD对最大跟腱力无显著性影响。

跟腱力的增加与踝关节跖屈力矩的增大及跟腱力臂的减小有关。本文发现,与正跟鞋相比,PFJP跑者穿着负跟鞋跑步时最大跟腱力时刻跟腱力臂与踝关节跖屈力矩均增大。由于力矩与力臂同时增大,使得跟腱力没有明显变化。以往研究发现,小腿环节与足环节的矢状面夹角在 $0^{\circ}\sim 159^{\circ}$ 时,跟腱力臂会随踝背屈角度的减小而增大^[27]。本文发现,在最大跟腱力时刻,穿着负跟鞋跑步时踝关节背屈角度减小,且小腿环节与足环节的角度在 $0^{\circ}\sim 159^{\circ}$ 范围内。因此,PFJP跑者在穿着负跟鞋跑步时最大跟腱力没有增大的主要原因可能是踝关节背屈角度减小。当穿着负跟鞋跑步时,跑者足地角较

小,着地位置更靠近前足,着地时刻踝关节更倾向于跖屈,从而可能导致最大跟腱力时刻踝关节背屈角度减小。

最大跟腱力反映了支撑期内跟腱所承受的最大负荷,而跟腱力冲量反映了负荷的累积效应。跟腱力冲量增大与跟腱力及跑步支撑期时间的增大有关。本文发现,HTD对支撑期时间无显著影响,而在12%~31%支撑期,穿着负跟鞋跑步时跟腱力大于零跟鞋;在12%~46%支撑期,穿着负跟鞋跑步时跟腱力大于正跟鞋,故跟腱力增大可能是跟腱力冲量增大的主要原因。该结果提示,长期穿负跟鞋跟腱可能要承受更大负荷。

由于跟腱力及其冲量的增大,PFPP跑者长时间穿着负跟鞋跑步时可能会增加跟腱处的损伤风险。因此,PFPP跑者在选择负跟鞋进行跑步前,应考虑自身跟腱的力学特性并进行适应性训练,以降低跟腱的损伤风险。

3.4 局限性与展望

本研究存在一定的局限性:① 本文用于计算髌股关节和跟腱力学参数生物力学模型所采用的相关方程均基于尸体研究,输入参数分别为伸膝力矩和屈膝角度、小腿环节与足环节的矢状面夹角和踝关节矢状面力矩,未考虑个体差异和水平面、冠状面的运动,这可能导致计算结果与真实情况存在差异。今后可尝试运用双平面正交荧光成像、超声影像仪等技术,精确测量髌股关节接触面积以及跟腱横截面积,并采用更全面精确的髌股关节及跟腱力学模型,计算髌股关节和跟腱力学参数,从而提高应力以及跟腱力计算的可靠性。② 膝痛可能对膝关节生物力学特征产生一定影响^[17],而本文并未严格控制每双跑鞋测试前膝关节疼痛程度一致,今后研究应避免因疼痛程度不一致而产生的实验误差。③ 受试者跑步习惯均为后足着地,而不同着地方式的下肢生物力学特征不同^[28],推广到习惯前足着地的PFPP跑者需谨慎。④ 受试者均为男性,而不同性别PFPP患者之间存在不同的生物力学特征,且女性比男性患PFPP风险更高^[29],今后应进一步将受试者扩大至女性PFPP患者。⑤ 仅探讨了HTD对PFPP跑者髌股关节和跟腱负荷特征的急性影响,还需要进一步明确长期穿着不同HTD跑鞋对髌股关节和跟腱的影响。

4 结论

与正跟鞋相比,PFPP跑者穿着负跟鞋跑步时PFJS和冲量较小,可能可以限制PFPP的进一步发展;与零跟鞋和正跟鞋相比,穿着负跟鞋跑步时跟腱力和跟腱力冲量较大,可能会增加跟腱损伤风险。建议PFPP跑者在更换负跟鞋前先进行适应性训练,从而在不增加跟腱损伤风险的同时限制PFPP的进一步发展。

利益冲突说明:无。

论文贡献说明:顾瑜负责论文撰写、数据采集与分析;郑志艺、曾全寿负责跑鞋设计;杨辰负责数据分析与论文撰写;万祥林负责提出研究思路、论文撰写与修改。

参考文献:

- [1] 杨辰,冯茹,万祥林,等. 跑步相关损伤危险因素与干预手段研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2022, 41(6): 484-493.
- [2] KAKOURIS N, YENER N, FONG DTP. A systematic review of running-related musculoskeletal injuries in runners [J]. J Sport Health Sci, 2021, 10(5): 513-522.
- [3] UTTING MR, DAVIES G, NEWMAN JH. Is anterior knee pain a predisposing factor to patellofemoral osteoarthritis? [J]. Knee, 2005, 12(5): 362-365.
- [4] 杨辰,曲峰. 髌股关节痛病因、治疗和分组的生物力学研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2017, 36(10): 927-932.
- [5] SELFE J, CALLAGHAN M, WITVROUW E, et al. Targeted interventions for patellofemoral pain syndrome (TIPPS): Classification of clinical subgroups [J]. BMJ Open, 2013, 3(9): e003795.
- [6] NUNES GS, SCATTONE SILVA R, DOS SANTOS AF, et al. Methods to assess patellofemoral joint stress: A systematic review [J]. Gait Posture, 2018(61): 188-196.
- [7] 张马森,崔婧,周兴龙,等. 跑鞋跟掌落差对跑步时着地方式和髌股关节应力负荷的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2022, 41(11): 841-848.
- [8] VANNATTA CN, KERNOZEK TW. Patellofemoral joint stress during running with alterations in foot strike pattern [J]. Med Sci Sports Exerc, 2015, 47(5): 1001-1008.
- [9] ZHANG M, ZHOU X, ZHANG L, et al. The effect of heel-to-toe drop of running shoes on patellofemoral joint stress during running [J]. Gait Posture, 2022(93): 230-234.
- [10] ROPER JL, HARDING EM, DOERFLER D, et al. The effects of gait retraining in runners with patellofemoral pain: A randomized trial [J]. Clin Biomech, 2016(35): 14-22.
- [11] YU P, HE Y, GU Y, et al. Acute effects of heel-to-toe

- drop and speed on running biomechanics and strike pattern in male recreational runners: Application of statistical nonparametric mapping in lower limb biomechanics [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021(9): 821530.
- [12] 邓力勤, 张希妮, 肖松林, 等. 跑姿再训练对跟腱形态学及等长收缩下跖屈力矩、跟腱力学特性的影响 [J]. *体育学刊*, 2021, 28(1): 139-144.
- [13] 张希妮, 邓力勤, 肖松林, 等. 不同鞋条件对后跟着地跑者跟腱负荷特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 797-804.
- ZHANG XN, DENG LQ, XIAO SL, *et al.* Effects of different shoe conditions on achilles tendon loading in runners with habitual rearfoot strike patterns [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 797-804.
- [14] LORIMER AV, HUME PA. Stiffness as a risk factor for achilles tendon injury in running athletes [J]. *Sports Med*, 2016, 46(12): 1921-1938.
- [15] BAZETT-JONES DM, NEAL BS, LEGG C, *et al.* Kinematic and kinetic gait characteristics in people with patellofemoral pain: A systematic review and meta-analysis [J]. *Sports Med*, 2023, 53(2): 519-547.
- [16] HAGHIGHAT F, EBRAHIMI S, REZAIIE M, *et al.* Trunk, pelvis, and knee kinematics during running in females with and without patellofemoral pain [J]. *Gait Posture*, 2021(89): 80-85.
- [17] 杨辰, 万祥林, 冯茹, 等. 膝痛对髌股关节痛业余跑者跑步和落地起跳缓冲期膝关节生物力学特征的影响 [J]. *中国体育科技*, 2022, 58(2): 62-68.
- [18] 张马森, 周兴龙, 刘卉. 基于统计参数映射分析跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷的影响 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1158-1164.
- ZHANG MS, ZHOU XL, LIU H. Effects of heel-to-toe drop of running shoes on lower limb joint loading based on statistical parameter mapping [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1158-1164.
- [19] ESCULIER JF, ROY JS, BOUYER LJ. Lower limb control and strength in runners with and without patellofemoral pain syndrome [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(3): 813-819.
- [20] YU B, GABRIEL D, NOBLE L, *et al.* Estimate of the optimum cutoff frequency for the butterworth low-pass digital filter [J]. *J Appl Biomech*, 1999(15): 319-329.
- [21] BRESLER B, FRANKEL JP. The forces and moments in the leg during level walking [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1950, 72(1): 27-36.
- [22] ALTMAN AR, DAVIS IS. A kinematic method for footstrike pattern detection in barefoot and shod runners [J]. *Gait Posture*, 2012, 35(2): 298-300.
- [23] 林瑞, 李秋捷, 杨辰, 等. 楼梯坡度对健康成人上楼行走时膝关节生物力学特征的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2023, 42(5): 359-365.
- [24] JANDACKA D, ZAHRADNIK D, FARANA R, *et al.* Footfall patterns of a runner with an Achilles tendon rupture [J]. *J Sport Health Sci*, 2017, 6(4): 498-502.
- [25] 张希妮, 邓力勤, 肖松林, 等. 不同跑步着地习惯对跟腱形态学及其负荷特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2024, 39(1): 132-138.
- ZHANG XN, DENG LQ, XIAO SL, *et al.* Effects of different shoe conditions on achilles tendon loading in runners with habitual rearfoot strike patterns [J]. *J Med Biomech*, 2024, 39(1): 132-138.
- [26] HO KY, HU HH, COLLETTI PM, *et al.* Running-induced patellofemoral pain fluctuates with changes in patella water content [J]. *Eur J Sport Sci*, 2014, 14(6): 628-634.
- [27] SELF BP, PAINE D. Ankle biomechanics during four landing techniques [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2001, 33(8): 1338-1344.
- [28] XU Y, YUAN P, WANG R, *et al.* Effects of foot strike techniques on running biomechanics: A systematic review and meta-analysis [J]. *Sports Health*, 2021, 13(1): 71-77.
- [29] BOLING MC, NGUYEN AD, PADUA DA, *et al.* Gender-specific risk factor profiles for patellofemoral pain [J]. *Clin J Sport Med*, 2021, 31(1): 49-56.