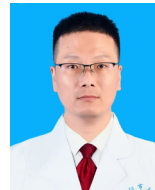


· 论著 · 骨骼肌肉 ·

分析下肢应力性骨折患者足部运动学参数与足弓指数的相关性

卜胜杰* 彭金阳

信阳市第三人民医院骨科(河南 信阳 464000)



【摘要】目的 探讨下肢应力性骨折患者足部运动学参数与足弓指数的相关性。**方法** 本研究中共纳入2021年9月至2024年9月收治的206例于信阳市第三人民医院接受足部影像学检查的研究对象,根据临床症状、体征及影像学诊断结果将所有患者分为发生下肢应力性骨折患者,设为研究组(72例)和未发生下肢应力性骨折的患者,设为参照组(134例)。对受试者进行足弓指数、足部运动学参数检测并统计,采用相关性软件分析受试者足部运动学参数与足弓指数的相关性,对两组研究对象足部运动学参数与足弓指数进行对比。**结果** 受试者足弓指数为0.20,着地仰角为 $(16.85 \pm 3.89)^\circ$,离地仰角为 $(62.74 \pm 5.20)^\circ$,拍地速度为 $(172.59 \pm 22.30)^\circ/\text{s}$,着地内翻角为 $(12.78 \pm 1.10)^\circ$,外翻幅度为 $(12.07 \pm 3.51)^\circ$,着地外翻速度为 $(379.10 \pm 18.25)^\circ$;相关性分析结果得出,受试者足弓指数与着地内翻角、外翻幅度均呈正相关关系($r=0.193$ 、 0.102 ,均 $P<0.05$),而与着地仰角、离地仰角、拍地速度、着地外翻速度均无相关性($r=-0.008$ 、 0.115 、 -0.042 、 -0.037 ,均 $P>0.05$);研究组患者足弓指数、离地仰角及着地外翻速度均比参照组下降($t=5.509$ 、 7.177 、 27.699 ,均 $P<0.05$),而两组研究对象着地仰角、拍地速度等指标对比,均未见明显差异($t=0.326$ 、 1.482 、 0.205 、 1.203 ,均 $P>0.05$)。**结论** 足弓指数与着地内翻角、外翻幅度均呈正相关关系,发生下肢应力性骨折的患者具有足弓指数、离地仰角较小,着地外翻速度较慢的特点,临床可据此探明下肢应力性骨折的发生机制,为预防及筛查该疾病提供参考。

【关键词】 应力性;骨折;足部运动学;参数;足弓指数;相关性

【中图分类号】 R683

【文献标识码】 A

DOI:10.3969/j.issn.1009-3257.2026.7.048

Analyzing the Correlation between Foot Kinematics Parameters and Arch Index in Patients with Lower Limb Stress Fracture

BU Sheng-jie*, PENG Jin-yang.

Department of Orthopedics, the Third People's Hospital of Xinyang, Xinyang 464000, Henan Province, China

Abstract: Objective To investigate the correlation between foot kinematics parameters and arch index in patients with lower limb stress fracture. **Methods** A total of 206 patients who received foot imaging examination in the Third People's Hospital of Xinyang from September 2021 to September 2024 were included in this study. According to clinical symptoms, signs and imaging diagnosis results, all patients were divided into the study group (72 cases) with lower extremity stress fracture and the patients without lower extremity stress fracture. As a reference group (134 cases). The arch index and foot kinematics parameters of the subjects were detected and counted, and the correlation software was used to analyze the correlation between the subjects' foot kinematics parameters and foot arch index, and the foot kinematics parameters and foot arch index of the two groups of subjects were compared. **Results** The subjects' arch index was 0.20, landing elevation angle was $(16.85 \pm 3.89)^\circ$, lifting elevation angle was $(62.74 \pm 5.20)^\circ$, beating speed was $(172.59 \pm 22.30)^\circ/\text{s}$, landing varus angle was $(12.78 \pm 1.10)^\circ$, and valus amplitude was $(12.07 \pm 3.51)^\circ$. The landing valgus velocity was $(379.10 \pm 18.25)^\circ$. The results of correlation analysis showed that the subject's arch index was positively correlated with landing varus angle and valus amplitude ($r=0.193$, 0.102 , all $P<0.05$), but had no correlation with landing elevation angle, landing elevation angle, landing speed and landing varus speed ($r=-0.008$, 0.115 , -0.042 , -0.037 , all $P>0.05$); The arch index, elevation off the ground and landing varus speed of patients in the study group were all decreased compared with those in the reference group ($t=5.509$, 7.177 , 27.699 , all $P<0.05$), while no significant differences were found in landing elevation angle and landing speed between the two groups ($t=0.326$, 1.482 , 0.205 , 1.203 , all $P>0.05$). **Conclusion** Arch index is positively correlated with landing varus angle and valgus amplitude. The patients with lower limb stress fracture have the characteristics of lower limb arch index, lower elevation angle and lower landing varus speed, which can be used to investigate the mechanism of lower limb stress fracture and provide reference for prevention and screening of this disease.

Keywords: Stress; Fracture; Foot Kinematics; Parameters; Arch Index; Correlation

下肢应力性骨折是一种由于长期反复劳损而引起的不完全骨折,常见于军事训练、运动员训练以及突然增加运动量的人群,该病发生的常见部位为足部,尤其是跖骨(约占所有应力性损伤的20%),常见于足部承重较多的运动员,如篮球、足球、长跑运动员等,患者常见症状为疼痛,局限于病变部位,早期疼痛不明显,随着时间的推移疼痛逐渐加剧,活动时加重,休息时减轻,还包括肿胀、功能障碍等^[1-2]。足弓指数是衡量足弓高度的一个指标,通常通过足底压力测量系统采集足

印图像来计算,足弓指数越大,代表足弓越低;足部运动学参数包括着地仰角、着地内翻角、离地仰角等,这些参数反映了足部在运动过程中的动态变化,不同足弓高度的足部在这些参数上表现出不同的特征。相关研究指出,足弓高度和足部运动学参数与下肢应力性骨折的发生有显著相关性,例如,低足弓和高足弓的个体在进行高强度训练时,发生下肢应力性骨折的风险较高^[3]。本研究共纳入206例于信阳市第三人民医院接受足部影像学检查的研究对象,根据临床症状、体征及影像学诊

【第一作者】 卜胜杰,男,主治医师,主要研究方向:创伤,运动医学,足踝。E-mail: yangsunxing979@163.com

【通讯作者】 卜胜杰

断结果将所有患者分为发生下肢应力性骨折患者和未发生下肢损伤的患者，均对其足弓指数、足部运动学参数进行检测，重点探讨了下肢应力性骨折患者足部运动学参数与足弓指数的相关性，内容如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究共纳入2021年9月至2024年9月收治的206例于信阳市第三人民医院接受足部影像学检查的研究对象。

纳入标准：均为男性患者；足弓正常者；临床资料完整者等。排除标准：入组前有影响下肢运动功能的外伤史者；近期使用过激素类药物治疗者；患有糖尿病等慢性代谢性疾病者等。根据临床症状、体征及影像学诊断结果将所有患者分为发生下肢应力性骨折患者，设为研究组(72例)和未发生下肢应力性骨折的患者，设为参照组(134例)。参照组研究对象平均年龄(19.31±1.42)岁；平均体重(68.33±7.10)kg；平均身高(174.89±4.33)cm。研究组患者平均年龄(19.45±1.37)岁；平均体重(68.25±7.05)kg；平均身高(175.10±4.27)cm。将两组研究对象基线资料对比，均未见明显差异(均P>0.05)，组间可实施对比。

1.2 研究方法

1.2.1 足弓指数检测 采用仪器为电容式足底压力测量系统(德国Zebris公司，型号 Fdm-1.5)，患者站在足底压力测量系统上，保持自然站立姿势，双脚均匀受力，系统会自动采集足印图像，并计算出足弓的长度和宽度。根据采集到的足印图像，测量足弓的长度(从脚跟到前脚掌的最长距离)和宽度(足弓最宽处的距离)。计算足弓指数，公式为：足弓指数=足弓高度/足弓长度。正常的足弓指数范围在0.20~0.28之间。如果指数小于1.7，表明足弓过平，存在平底足的风险。

1.2.2 足部运动学特征相关参数检测 采用仪器为动态步态体态分析系统(深圳行正科技有限公司，Right Gait & Posture)对足部运动学各项参数予以采集，嘱受试者穿戴上有传感器的鞋垫，以自然步态向前走20m之后返回起点，对各项参数予以检测，包括着地仰角、离地仰角、拍地速度、着地内翻角、外翻幅度、着地外翻速度，使用三维运动捕捉系统(如红外摄像机)记录上述指标的各项变化。着地仰角指足部在着地瞬间，足底与地面之间的角度，这个角度可以帮助分析足部在着地时的姿势和稳定性；离地仰角指足部在离地瞬间，足底与地面之间的角度，这个角度可以反映足部在摆动相开始时的姿势和准备情况；拍地速度指足部在着地时与地面接触的速度，这个参数可以用来评估步行的冲击力和步态的平稳性；着地内翻角指足部在着地瞬间，足部相对于垂直轴向内旋转的角度，这个角度可

以反映足部在着地时的内翻程度，有助于分析足部的稳定性和异常步态；外翻幅度指足部在步行过程中，足部相对于垂直轴向向外旋转的最大角度，这个参数可以用来评估足部的外翻程度和步态的稳定性；着地外翻速度指足部在着地瞬间，足部相对于垂直轴向向外旋转的速度，这个参数可以反映足部在着地时的外翻速度，有助于分析步态的动态特征和异常情况。

1.3 观察指标 (1)统计受试者患者足弓指数、足部运动学参数。(2)采用相关性软件分析两者之间的相关性。(3)对两组研究对象足部运动学参数与足弓指数进行对比。

1.4 统计学方法 应用SPSS 24.0软件对文中数据进行分析，两组研究对象足部运动学参数、足弓指数以($\bar{x} \pm s$)表示，采用t检验；计数资料以[例(%)]表示，采用 χ^2 检验。以P<0.05表示有统计学差异。

2 结果

2.1 受试者足弓指数、足部运动学参数 受试者足弓指数为0.20，着地仰角为(16.85±3.89)°，离地仰角为(62.74±5.20)°，拍地速度为(172.59±22.30)°/s，着地内翻角为(12.78±1.10)°，外翻幅度为(12.07±3.51)°，着地外翻速度为(379.10±18.25)°。

2.2 足弓指数与足部运动学参数的相关性 相关性分析结果得出，受试者足弓指数与着地内翻角、外翻幅度均呈正相关关系(r=0.193、0.102，均P<0.05)，而与着地仰角、离地仰角、拍地速度、着地外翻速度均无相关性(r=-0.008、0.115、-0.042、-0.037，均P>0.05)，见表1。

2.3 两组研究对象足弓指数与足部运动学参数比较 研究组患者足弓指数、离地仰角及着地外翻速度均比参照组下降(t=5.509、7.177、27.699，均P<0.05)，而两组研究对象着地仰角、拍地速度等指标对比，均未见明显差异(t=0.326、1.482、0.205、1.203，均P>0.05)，见表2。

表1 足弓指数与足部运动学参数的相关性

参数	足弓指数	
	r值	P值
着地仰角	-0.008	>0.05
离地仰角	0.115	>0.05
拍地速度	-0.042	>0.05
着地内翻角	0.193	<0.05
外翻幅度	0.102	<0.05
着地外翻速度	-0.037	>0.05

表2 两组研究对象足弓指数与足部运动学参数比较

组别	足弓指数	着地仰角(°)	离地仰角(°)	拍地速度(°/s)	着地内翻角(°)	外翻幅度(°)	着地外翻速度(°/s)
研究组(72例)	0.19±0.08	17.33±3.22	60.87±4.29	172.33±16.33	12.96±4.53	11.73±3.14	340.21±12.29
参照组(134例)	0.24±0.05	17.51±4.05	65.14±3.95	176.44±20.25	13.09±4.25	12.33±3.55	385.71±10.64
t值	5.509	0.326	7.177	1.482	0.205	1.203	27.699
P值	<0.001	0.745	<0.001	0.140	0.838	0.230	<0.001

3 讨论

应力性骨折通常是由于长期、反复的轻微损伤累积而成,当肌肉过度使用而疲劳时,它们吸收震动和分散应力的能力下降,导致更多的应力直接传递到骨骼上;在正常情况下,骨骼可以通过内部结构的改建逐步适应增加的负荷,然而,当应力超过骨骼的适应能力时,会导致微小的骨裂或骨折,这种过度的应力通常发生在下肢的承重部位,如小腿的胫骨和足部的骨骼;过多的应力首先引起小腿肌肉疲劳,使其失去吸收应力的作用,当肌肉无法有效吸收震动时,应力直接作用于骨骼,导致骨膜炎甚至骨折^[4-5]。临床研究指出,扁平足患者的足弓较低或缺失,导致足部的缓冲和减震能力减弱,这使得足部和下肢的其他部位(如小腿、膝盖、髌部)在运动时承受更大的冲击力,增加了应力性骨折的风险;高弓足患者的足弓较高,足部的柔韧性较差,导致足部在运动时的适应能力下降,这种情况下,足部和下肢的其他部位也可能承受不均匀的压力,增加应力性骨折的风险;足弓异常会导致下肢力线的改变,例如,扁平足会导致胫骨内旋、膝关节内翻等,这些改变会增加下肢骨骼和关节的应力,从而增加应力性骨折的风险;足弓异常会影响跑步姿势和步态,例如,扁平足患者在跑步时会出现足部过度旋前,这会增加下肢骨骼和关节的应力,从而增加应力性骨折的风险^[6-7]。

本研究中将受试者足弓指数与足部运动学参数的相关性进行分析得出,受试者足弓指数与着地内翻角、外翻幅度均呈正相关关系,而与着地仰角、离地仰角、拍地速度、着地外翻速度均无相关性,分析原因,足弓指数反映了足弓的高度和形态,高足弓指数意味着足弓较高,而低足弓指数则意味着足弓较低或扁平;内翻角和外翻幅度是指足部在着地时相对于垂直轴的倾斜角度,高足弓指数通常与足内翻相关,而低足弓指数则与足外翻相关,因此,足弓指数与内翻角和外翻幅度呈正相关关系^[8-9];着地仰角和离地仰角主要反映了足部在着地和离地时相对于水平面的倾斜角度,它们更多地受到足部肌肉力量、关节灵活性和步态模式的影响,而不是直接由足弓结构决定;由于着地仰角和离地仰角与足弓结构的关系不直接,因此足弓指数与这些角度之间没有明显的相关性;拍地速度和着地外翻速度主要反映了足部在着地时的动态特性,包括足部与地面接触的速度和足部外翻的速度,这些参数受到多种因素的影响,如步速、步幅、肌肉力量和关节灵活性等,由于拍地速度和着地外翻速度与足弓结构的关系不直接,因此足弓指数与这些速度参数之间没有明显的相关性^[10-11]。

本研究中对比了两组研究对象足弓指数与足部运动学参数,结果得出,研究组患者足弓指数、离地仰角及着地外翻速度均比参照组下降,而两组研究对象着地仰角、拍地速度等指标对比,均未见明显差异,说明下肢应力性骨折患者足弓指数、离地仰角均下降,着地外翻速度减慢,其原因在于足弓指数较低(即扁平足)会导致足部对地面冲击力的吸收能力下降,

增加下肢骨骼的负担,从而增加应力性骨折的风险,因此,应力性骨折患者表现出较低的足弓指数^[12-13];离地仰角是指足部离地时的角度,应力性骨折患者因为疼痛或保护性机制,改变了步态,导致离地仰角下降;着地外翻速度是指足部着地时外翻的速度,应力性骨折患者因为疼痛或保护性机制,减少了足部外翻的速度,以减轻对受伤部位的冲击^[14];着地仰角和拍地速度在不同人群中相对稳定,不易受到应力性骨折的影响,这些参数更多地与个人的步态习惯和运动方式有关,而不是直接与应力性骨折相关^[15-16]。

综上所述,足弓指数与着地内翻角、外翻幅度均呈正相关关系,发生下肢应力性骨折的患者具有足弓指数、离地仰角较小,着地外翻速度较慢的特点,临床可据此探明下肢应力性骨折的发生机制,为预防及筛查该疾病提供参考。

参考文献

- [1] Foti G, Sanfilippo L, Longo C, et al. Diagnostic accuracy of dual-energy CT for bone stress injury of the lower limb[J]. *Radiology*, 2024, 313(2): e232415.
- [2] 聂杰, 管岩平, 曹煜, 等. 超声引导下腰丛-坐骨神经阻滞对部队新兵下肢应力性骨折患者术中应激及术后认知功能的影响[J]. *海军医学杂志*, 2024, 45(9): 906-909.
- [3] 杜阳阳, 黄欣, 杨海晨. 军事训练中士兵下肢应力性骨折的成因、预防及康复[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(9): 33-40.
- [4] 冯勇. 不同足弓高度的足部运动学特征与下肢应力性骨折的相关性分析[D]. 延安: 延安大学, 2021.
- [5] Gatto A, Stucchi S, Brambilla L, et al. Orthoplastic management of lower limb traumas: a retrospective study on polytraumas versus isolated injuries[J]. *Ann Plast Surg*, 2024, 93(4): 496-500.
- [6] 张燊, 崔科东, 张希妮, 等. 足部功能训练对足趾肌力和足弓生物力学的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(4): 249-258.
- [7] 谭平, 李勋章, 刘明慧. 军事训练人员下肢应力性骨折风险预测模型的构建[J]. *当代护士*, 2024, 31(22): 151-156.
- [8] 冯勇, 赵燕旭, 董宏彬, 等. 足弓指数与足部运动学参数的相关性分析及两者在下肢应力性骨折中的特点[J]. *中华创伤杂志*, 2022, 38(9): 828-833.
- [9] 唐文浩. 新训人员应力性骨折流行病学特征及维生素D联合钙的预防作用研究[D]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2022.
- [10] 周莺, 孙燕, 郭辰, 等. MRI在青少年应力性骨折中的诊断价值研究[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2021, 27(4): 341-346.
- [11] 韩向东, 陈新良, 王维军, 等. 胫骨近端应力性骨折术后钢板断裂合并重度膝关节关节炎[J]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2022, 16(3): 381-383.
- [12] 高金卯, 孙百胜. 武警某部不同年龄阶段官兵应力性骨折特点分析[J]. *中华灾害救援医学*, 2020, 8(11): 615-617.
- [13] 张广峰, 王兴存, 尤兆山, 等. 非条件Logistic回归模型于早期应力性骨折诊断中应用效果研究[J]. *临床军医杂志*, 2020, 48(3): 301-302.
- [14] 朱婷. 三踝骨折术后恢复期的相关临床评估及下肢生物力学特征研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [15] 赵燕旭, 张钊, 罗东, 等. 下肢应力性骨折相关风险因素及未来的研究方向[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(9): 1422-1429.
- [16] 张幸, 陈锐, 祝鑫. 海军陆战队军事训练致下肢应力性骨折发生率风险因素分析[J]. *解放军预防医学杂志*, 2020, 38(10): 23-25.

(收稿日期: 2025-05-21)

(校对编辑: 韩敏求)

(排版编辑: 刘淮嘉)