

# 基于足底压力及三维步态分析技术对拇趾外翻步态的力学分析

郭紫嫣<sup>1</sup> 梁佩文<sup>1</sup> 孙卫东<sup>1</sup> 程程<sup>1</sup> 蒋科卫<sup>1</sup> 陈思<sup>1△</sup>

**[摘要]** **目的:**比较拇趾外翻患者与正常人步行模式下足底的力学结构变化,探讨拇趾外翻导致的足部力学结构改变。**方法:**采用回顾性研究方法,收集2022年10月至2023年6月就诊的拇趾外翻患者47例(男2例,女45例)和正常受试者47例(男2例,女45例)。比较两组步行模式下第一跖骨至第五跖骨(M1~M5)动态峰值压力、峰值压强、峰值冲量及三维步态参数(步长、步速、步频、步幅、步宽、跨步均匀度、支撑相百分比、摆动相百分比、总双支撑相百分比、足偏离角度及步态周期等)。**结果:**拇趾外翻组M2、M3跖骨头的峰值压力、峰值压强和峰值冲量测量值明显大于正常受试组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ );两组M1、M4、M5跖骨头下峰值压力、峰值压强和峰值冲量差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。两组时空参数包括步长、步速、步频、步幅、步宽及跨步均匀度测量值的差异无统计学意义( $P > 0.05$ );两组运动学参数(支撑相百分比、摆动相百分比、总双支撑相百分比、步态周期)测量值差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),拇趾外翻组足偏角测量值明显小于正常受试组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。**结论:**拇趾外翻导致前足负重增加,运动轨迹外移,足偏角减小使足部力线发生改变,髌膝关节发生潜在损伤的概率增加。

**[关键词]** 拇趾外翻;足;力学结构;足底压力;三维步态分析

**[中图分类号]** R682.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2024)09-0012-05

**DOI:** 10.20085/j.cnki.issn1005-0205.240903

## Study on Gait Mechanics of Hallux Valgus Based on Plantar Pressure Test System and Three-Dimensional Gait Analysis Technique

GUO Ziyan<sup>1</sup> LIANG Peiwen<sup>1</sup> SUN Weidong<sup>1</sup> CHENG Ting<sup>1</sup> JIANG Kewei<sup>1</sup> CHEN Si<sup>1△</sup>

<sup>1</sup>Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China.

**Abstract** **Objective:** To compare the changes of plantar pressure under gait mode between patients with hallux valgus and normal volunteers, and to explore the mechanical changes of foot caused by hallux valgus. **Methods:** A retrospective study was used to collect the data of plantar pressure and three-dimensional gait in walking mode of 47 patients (2 male and 45 female) with hallux valgus and 47 normal volunteers (2 male and 45 female) from October 2022 to June 2023. The dynamic peak force (PF), peak pressure (PP), peak impulse (PI), and three-dimensional gait parameters (stride length, pace, frequency, stride length, stride width, stride uniformity, support phase percentage, swing phase percentage, total double support phase percentage, foot deviation angle, and gait cycle) from the first to fifth metatarsals (M1–M5) in walking mode between two groups were compared. **Results:** The peak force, peak pressure and peak impulse measurements of the M2 and M3 metatarsal heads in the hallux valgus group were significantly higher than those in the normal group, and the differences were statistically significant ( $P < 0.05$ ). There was no statistically significant difference in peak force, peak pressure and peak impulse under the metatarsal head between the two groups of M1, M4, and M5 ( $P > 0.05$ ). There was no statistically significant difference in the measurement values of two sets of spatiotemporal parameters ( $P > 0.05$ ), including step length, step speed, step frequency, step amplitude, step width, and step uniformity. There was no statistically significant

difference in the measured values of two sets of kinematic parameters (support phase percentage, swing phase percentage, total double support phase percentage, and gait cycle) ( $P > 0.05$ ). The measured values of foot deviation angle in the hallux valgus group were significantly smaller than those in the normal group, and the difference was statis-

基金项目:中国中医科学院望京医院基础研究苗圃培育计划

课题(WJYY-YJKT-2022-01)

<sup>1</sup> 中国中医科学院望京医院(北京,100102)

<sup>△</sup>通信作者 E-mail:410547192@qq.com

tically significant ( $P < 0.05$ ). **Conclusion:** Hallux valgus leads to an increase in the load on the forefoot, an outward movement trajectory, a decrease in foot deviation angle, and a change in the force line of the foot, and make the likelihood of potential damage to the hip and knee joints increase.

**Keywords:** hallux valgus; foot; mechanical structure; plantar pressure; three-dimensional gait analysis

拇趾外翻是一种前足畸形,临床表现为拇趾向外侧倾斜,拇趾内侧疼痛,行走时足底疼痛及活动受限等<sup>[1]</sup>。作为一种进行性、不可逆的疾病<sup>[2]</sup>,拇趾外翻不仅会影响足部的功能,还会引起整个足底压力及步态的异常<sup>[3-4]</sup>。分析比较拇趾外翻患者与正常人步行模式下足底压力的异同,评估拇趾外翻患者足底力学变化,对于该疾病的防治及并发症的干预具有重要意义<sup>[5]</sup>。

足底压力测试和三维步态分析系统是现阶段广泛应用于临床,用以评估足部力学和步态运动轨迹的重要工具<sup>[6-8]</sup>,目前国内对于拇趾外翻导致的足部力学研究较少,以单纯足底压力测量或步态运动评估为主,缺乏将足底压力与步态运动两种方法结合进行综合评估的研究<sup>[6-8]</sup>。本研究应用足底压力测试系统和三维步态分析技术,对 2022 年 10 月至 2023 年 6 月于本科就诊的拇趾外翻患者 47 例和正常人志愿者 47 例的足底压力及三维步态指标进行采集、测量、分析,比较总结拇趾外翻足底应力分布的规律及步态运动特征,现报告如下。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 研究对象

收集 2022 年 10 月至 2023 年 6 月于本院就诊的拇趾外翻患者 47 例(94 足)和正常受试者 47 例(94 足),分为拇趾外翻组和正常受试组。所有受试者都签署知情同意书,本研究已经过医院伦理委员会审核批准。

### 1.2 诊断标准

参照 2017 年拇趾外翻诊疗专家共识诊断标准<sup>[9]</sup>:

1)拇趾向外侧倾斜伴内侧疼痛或肿胀;2)拇趾局部压痛阳性;3)拇趾外翻角  $> 15^\circ$  和(或)第一、二跖骨间角  $> 9^\circ$ 。

### 1.3 纳入标准

患者纳入标准:1)符合上述诊断标准;2)患者年龄为 20~75 岁;3)无足踝其他畸形;4)  $40^\circ \geq$  拇趾外翻角  $> 15^\circ$  和(或)  $16^\circ \geq$  第一、二跖骨间角  $> 9^\circ$  的轻中度患者;5)自愿与本研究,并签署知情同意书。

正常人志愿者纳入标准:1)无足部疾病及外伤病史;2)足部行走步态正常;3)无脊柱及四肢关节病史;4)年龄为 20~75 岁;5)自愿参与本研究,并签署知情同意书。

### 1.4 排除标准

1)糖尿病患者;2)严重心理及精神疾病患者;3)足部外伤或神经损伤患者;4)足部急性或亚急性感染患者;5)严重足、髌、膝、踝关节炎患者。

### 1.5 方法

**1.5.1 足底压力测量方法** 采用的测试设备为爱尔兰康公司的 Footscan 足底压力测试一米平板,采样频率为 500 Hz。测试方法:测试开始前,在系统软件中输入测试者基本信息包括姓名、性别、身高、体重及其鞋码,进行信息输入及传感器校准。测试时嘱受试者以正常步速(95~117 步/min)匀速沿着测试通道行走,行走过程中足部应均匀落到测试力板上。每名被测试者均由一名记录员测量 3 次并记录数据。

**1.5.2 三维步态分析测量方法** 采用 RealGait 德长三维步态与运动分析系统(DC-G-200),采集传感器动作捕捉系统传来的肢体 BVH 检测数据,进行三维全身关节动力学、运动学整合数据。1)测试前将传感器依次佩戴于受试者身体各个部位(头部、躯干、上臂、前臂、腕部、骨盆、双下肢、足踝部),传感器蓝色光标朝下,双脚传感器蓝色光标朝向脚尖方向,大腿传感器高于膝盖 10 cm,小腿传感器要低于膝盖 10 cm,大小腿水平平行,肌肉发达者需将传感器向外侧偏移。2)对传感器进行校准,双足传感器中心间距(光标根部)在 20 cm 左右,双脚脚尖保证向前,垂直下蹲(膝盖需与脚尖在同一个矢状面上),膝盖不能外展或者内收,双脚不能外八字或者内八字,校准完成过后需让受试者保持站立不动。3)步态测试时需要连接设备后获取参考位点,读取参考点时立正站直不动,面朝前进方向,受试者测试时,足落地要稳,最好能全足接触地面,否则会影响时空参数的准确性。4)步态测试过程同前。

### 1.6 评价指标

**1.6.1 足底压力评价指标** 采用 Footscan 7.9 软件对足底压力数据进行采集及分析,按照前足解剖结构,将 Footscan 7.9 软件采集的足底压力数据分为 5 个跖骨测量区域,分别用 M1~M5 表示。测试选取步态周期中每个跖骨头达到的力学最大测量值<sup>[10-12]</sup>,采集测量区域每个跖骨头的峰值压力、峰值压强和峰值冲量数据。

**1.6.2 三维步态分析评价指标** 采用 RealGait 的 Mosens 1.2.6 版本数据采集软件对被测试者测量数据

进行三维建模及测量,通过软件分析受试者双足时空参数(步长、步速、步频、步幅、步宽及跨步均匀度)、运动学参数(支撑相百分比、摆动相百分比、总双支撑相百分比、足偏离角度、步态周期)<sup>[8,13]</sup>。

1.7 统计学方法

采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,计数资料采用  $\chi^2$  检验,计量资料采用  $\bar{x}\pm s$  形式表示,符合正态分布采用  $t$  检验,不符合正态分布采用 Wilcoxon 秩和检验,  $P<0.05$  差异有统计学意义。

表 1 拇趾外翻组与正常受试组基线资料比较( $\bar{x}\pm s$ )

组别	性别		年龄/岁	体重/kg	鞋码/cm
	男/例	女/例			
拇趾外翻组	2	45	53.38±12.08	61.77±6.47	38.11±1.36
正常受试组	2	45	51.11±13.51	60.11±8.92	37.70±0.99
统计检验值	$\chi^2=0.032$		$t=0.893$	$t=1.062$	$t=1.771$
$P$	0.858		0.374	0.291	0.080

2.2 足底压力测量结果

拇趾外翻患者和正常受试者的峰值压力、峰值压强和峰值冲量测量结果见表 2,两组 M2、M3 跖骨头的峰值压力、峰值压强和峰值冲量测量值的差异有统计学意义( $P<0.05$ ),拇趾外翻组 M2、M3 跖骨头下峰值压力、峰值压强和峰值冲量测量值较正常组明显增大;两组 M1、M4、M5 跖骨头下峰值压力、峰值压强和峰

2 结果

2.1 一般资料

本研究共纳入双足拇趾外翻患者 47 例和正常受试者 47 例。拇趾外翻组 47 例 94 足,包括男 2 例,女 45 例;年龄为 24~72 岁,平均为 53.38 岁。正常受试组 47 例 94 足,包括男 2 例,女 45 例;年龄为 24~70 岁,平均为 51.11 岁。两组性别、年龄、体重、鞋码等一般资料比较,差异均无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性。两组基线资料见表 1。

值冲量差异无统计学意义( $P>0.05$ ),拇趾外翻组 M1、M4、M5 跖骨头下峰值压力、峰值压强和峰值冲量测量值较正常组无明显变化。两组峰值压力、峰值压强和峰值冲量测量值由大到小依次为  $M2>M3>M1>M4>M5$ ,拇趾外翻组与正常组测量值从第二跖骨头至第五跖骨头逐渐降低,见表 2。

2.3 三维步态分析结果

表 2 拇趾外翻组与正常受试组足底峰值压力、峰值压强及峰值冲量比较( $n=94,\bar{x}\pm s$ )

组别	测量部位	峰值压力/N	峰值压强/Pa	峰值冲量/(N·s)
拇趾外翻组	M1	18.81±8.98	16.03±7.17	7.61±3.72
	M2	49.86±33.70	40.92±16.50	16.49±10.58
	M3	45.07±18.31	38.18±16.72	14.39±6.82
	M4	17.67±9.91	14.86±6.27	7.33±3.61
	M5	14.01±7.19	12.37±4.92	6.23±3.51
正常受试组	M1	19.05±4.14	16.53±4.41	7.81±2.31
	M2	23.05±3.41	20.64±2.60	10.30±2.37
	M3	21.07±3.51	18.84±3.15	8.86±2.02
	M4	17.07±3.76	13.93±2.03	7.07±1.54
	M5	13.58±3.27	11.64±2.02	5.82±1.44
$P$		<0.001	<0.001	<0.001

2.3.1 时空参数 两组时空参数包括步长、步速、步频、步幅、步宽及跨步均匀度测量值的差异无统计学意

义( $P>0.05$ ),见表 3。

2.3.2 运动学参数 两组的运动学参数(支撑相百分

表 3 拇趾外翻组与正常受试组时空参数比较( $n=94,\bar{x}\pm s$ )

组别	步长/m	步速/(m·s <sup>-1</sup> )	步频/(步·min <sup>-1</sup> )	步幅/m	步宽/m	跨步均匀度
拇趾外翻组	0.56±0.24	0.88±0.18	113.81±13.63	1.08±0.23	0.09±0.07	0.20±0.27
正常受试组	0.55±0.09	0.85±0.16	121.06±13.09	1.08±0.16	0.08±0.05	0.17±0.31
$t$	0.314	0.780	1.939	0.047	0.307	0.604
$P$	0.754	0.438	0.057	0.962	0.760	0.547

比、摆动相百分比、总双支撑相百分比、足偏离角度、步态周期)测量结果见表 4,其中支撑相百分比、摆动相百分比、总双支撑相百分比、步态周期测量值的差异无统计学意义( $P>0.05$ ),足偏角测量值的差异有统计

学意义( $P<0.05$ ),拇趾外翻组平均足外偏角度比正常组减小。

2.4 典型病例各测试指标

拇趾外翻患者和正常受试者采用 Footscan 足底

压力测试系统和三维步态测试技术测量足底力学指标和步态运动指标见图 1-图 4。

表 4 拇趾外翻组与正常受试组运动学参数比较(n=94,  $\bar{x} \pm s$ )

组别	双足支撑相 百分比/%	摆动相 百分比/%	总双支撑相 百分比/%	足偏角/(°)	步态周期/ms
拇趾外翻组	53.39±4.12	46.61±4.12	6.43±8.17	0.19±6.46	1 145.33±138.56
正常受试组	53.57±4.82	46.31±4.78	4.49±2.60	-2.57±7.64	1 158.72±108.19
t	0.214	0.359	1.396	2.075	0.522
P	0.831	0.720	0.165	0.040	0.603

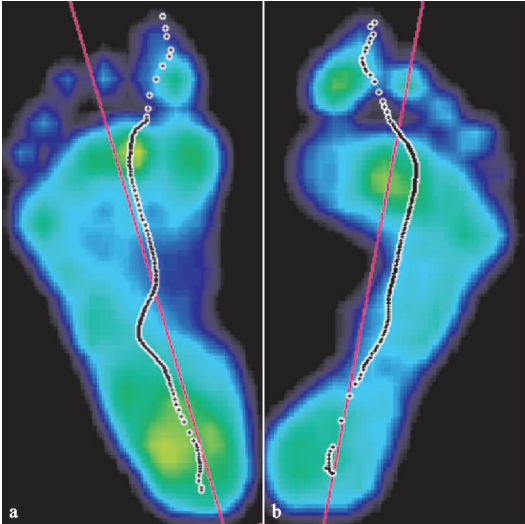


图 1 正常受试者 1,女,53 岁,采用 Footscan 足底压力测试系统对足底压力进行评估,足底压力正常,运动轨迹在第一、二趾间

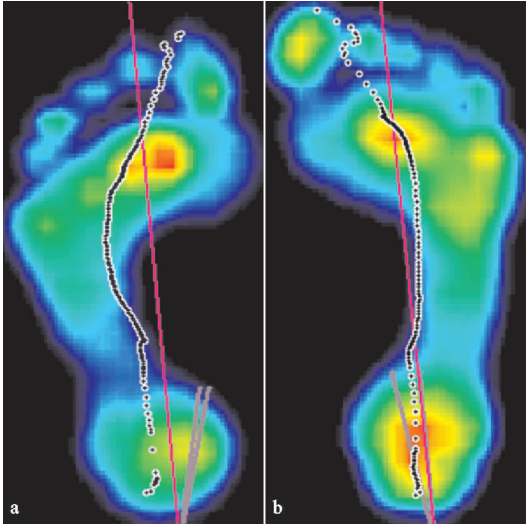


图 2 拇趾外翻患者 1,女,57 岁,采用 Footscan 足底压力测试系统对足底压力进行评估,足底第二、三跖骨压力异常,运动轨迹外移

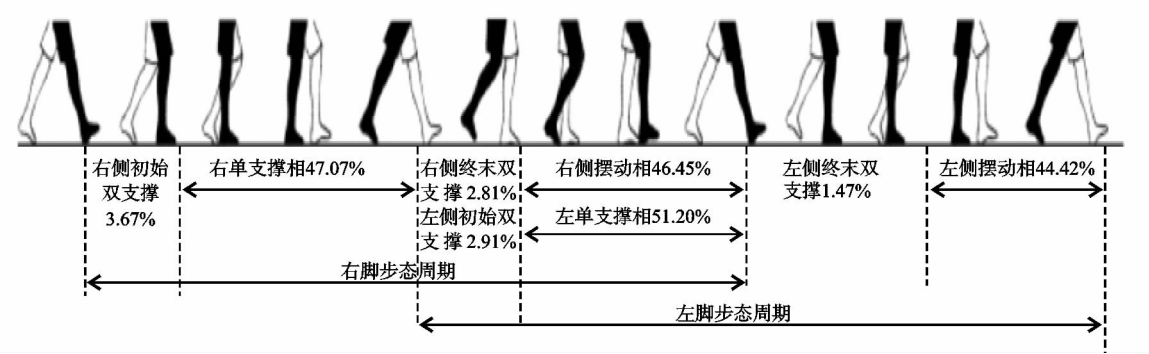


图 3 正常受试者 1,女,53 岁,采用三维步态测试技术对正常受试者步态运动周期进行评估

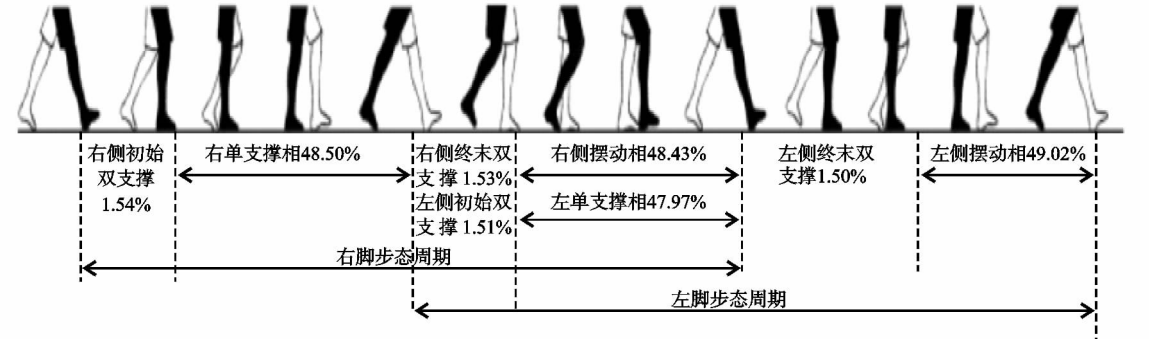


图 4 拇趾外翻患者 1,女,57 岁,采用三维步态测试技术对拇趾外翻患者步态运动周期进行评估

3 讨论

拇趾外翻畸形会导致足底应力发生变化。本研究通过使用足底压力测试系统,获取的受试者在步行过

程中的足底压力数据显示,正常人群的足底压力呈现出较为均匀的分布,压力平均分布于前足横弓。在行走过程中,正常人足底压力呈现出动态变化,从足跟触

地时的较大压力逐渐向前转移,至前脚掌推离地面时达到最大,足底力学分布依次递减( $M2 > M3 > M1 > M4 > M5$ ),足底前足运动轨迹在第一、二跖骨之间。

正常人足底压力与前足跖骨形态及跖骨负重密切相关,拇趾外翻畸形导致足部结构发生改变,足弓负重和足底应力分布异常<sup>[14]</sup>。对比正常人志愿者者,拇趾外翻患者的足底压力分布存在明显异常。在行走过程中,患者的前脚掌压力分布不均,足底压力曲线呈现出不规律的波动,主要集中在足弓区域,表现为第二、三跖骨的力学测量值(峰值压力、峰值压强及峰值冲量)明显高于正常组,力学分布表现为第二、三跖骨头明显增高,其余跖骨头依次降低( $M2 > M3 > M1 > M4 > M5$ ),说明拇趾外翻畸形导致第二、三跖骨负重增加,足部运动轨迹异常。这与拇趾外翻导致的足部力学平衡失调有关,第一跖骨内收后导致前足横弓塌陷,使第二、三跖骨头下负重增加,足部运动轨迹外移<sup>[15]</sup>,这种不均匀的压力分布不仅可能引发足部疼痛和胼胝,还可能导致足部肌肉和韧带的过度疲劳,进一步加重畸形。

拇趾外翻除了导致足底压力变化外,其引起的步态轨迹及姿势的变化也会影响足部应力的分布。本组患者时空参数及步态周期参数与正常受试者无明显差异,说明拇趾外翻患者步态行走时步行效率、平衡稳定性及整个步态周期运动时间及摆动能力与正常人相同。拇趾外翻导致的步态轨迹变化和姿势变化是一个渐进性的过程,本研究中纳入的患者为轻中度的患者,且患病时间较短,故上述指标未见明显异常。

足偏角为足中心线与同侧步行直线之间的夹角,与正常受试组相比,拇趾外翻组的足偏角明显减小,足偏角的变化会影响步态的重心及运动轨迹。足偏角减小,说明拇趾外翻行走时重心由足内侧向外侧偏移<sup>[16]</sup>。足部重心及力线发生的改变,可能导致膝关节和髌关节的生物力学负荷增加,增加关节磨损和损伤的风险。

本研究存在一定的局限性:本研究样本量有限,研究结果可能无法完全代表所有拇趾外翻患者的步态特征;本研究采用回顾性研究方法,后续需进行随机对照试验以增加结果可信度;另外,本研究仅关注了拇趾外翻患者与正常人群在足底压力及步态方面的差异,未对患者的生活质量、疼痛程度等其他相关因素进行深入分析。

总之,在拇趾外翻的发生、发展过程中,足底压力和步态运动发生显著的改变。拇趾外翻因第一跖趾关节的结构异常造成前足第二、三跖骨应力负荷增加,运动轨迹发生外移。足外偏角度的减小可引起膝、髌关节的应力增加,潜在的关节损伤风险提高。通过运用足底压力测量及步态测试可对拇趾外翻早期进行诊断

及评估,并进行早期干预防治,如足部肌肉力量训练、鞋垫辅助等,以预防或延缓拇趾外翻的进展。

## 参考文献

- [1] 温建民. 拇外翻诊断与治疗方法选择的探讨[J]. 中国骨伤, 2018, 31(3): 199-202.
- [2] OMAE H, OHSAWA T, HIO N, et al. Hallux valgus deformity and postural sway: a cross-sectional study[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2021, 22(1): 503.
- [3] 程继强, 刘彬. 应力性跖痛症的手术治疗进展综述[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(6): 141-142.
- [4] 杨杰, 梁晓军, 李毅, 等. 趾长屈肌肌腱转位结合 Weil 截骨治疗: 外翻跖痛症[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(17): 1610-1612.
- [5] 黄萍, 钱念东, 齐进, 等. 拇外翻发病危险因素与足底压力特征[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(42): 6351-6356.
- [6] 陈思, 林新晓, 孙卫东, 等. 微创截骨治疗小趾囊炎足底压力变化[J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29(5): 428-432.
- [7] SUZUKI T, NATSUME J, ITO Y, et al. Effect of levodopa on pathological gait in Dravet syndrome: a randomized crossover trial using three-dimensional gait analysis[J]. Epilepsia, 2024, 65(5): 1304-1313.
- [8] 俞艳, 姜淑云, 李阳, 等. 基于三维步态分析技术对拇外翻儿童步态变化的研究[J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(4): 259-264.
- [9] 中华医学会骨科学分会足踝外科学组, 中国医师协会骨科医师分会足踝外科专业委员会. 拇外翻诊疗专家共识[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2017, 9(10): 30-42.
- [10] 吴烨铎. 基于 Footscan 的足底力学特征与行走速度相关关系的研究[J]. 警察技术, 2020(1): 52-55.
- [11] 梁颖, 郑茜雅, 黄子怡, 等. Footscan 平台测压系统压力中心参数的信度研究[J]. 中医康复, 2024, 1(2): 19-22.
- [12] 杨佳英, 卢熊伟, 宋雅伟. Footscan 测量正常青年人足底压力参数的可靠性分析[J]. 中国皮革, 2024, 53(2): 77-82.
- [13] 何任杰, 宁梓文, 施政良, 等. 个性化股骨定位器辅助前交叉韧带重建术后膝关节三维运动学分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2023, 37(6): 663-669.
- [14] NAKAJIMA K, KOBAYASHI Y, TADA M, et al. Evaluation of plantar pressures in people with hallux valgus using principal component analysis[J]. Technology and Health Care: Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine, 2018, 26(4): 667-674.
- [15] 王宏业, 何引飞. 外翻足的足横弓塌陷力学分析[J]. 中国矫形外科杂志, 2000, 7(9): 925-926.
- [16] HOFMANN U K, GÖTZE M, WIESENREITER K, et al. Transfer of plantar pressure from the medial to the central forefoot in patients with hallux valgus[J]. BMC Musculoskel Dis, 2019, 20(1): 149.