

文章编号: 1004-7220(2023)03-0561-07

股骨内翻和胫骨内翻的运动学和足底压力分析

代菁^{1,2}, 马剑雄^{2,3}, 柏豪豪^{2,3}, 卢斌^{2,3}, 吴研飞^{1,2}, 马信龙^{1,2,3}

(1. 天津医科大学 骨科临床学院, 天津 300203; 2. 天津市骨科生物力学与医学工程重点实验室, 天津 300050;
3. 天津市天津医院 骨科研究所, 天津 300050)

摘要:目的 探究胫骨侧和股骨侧来源的两种单侧膝骨关节炎膝内翻在步态分析中的运动学参数和足底压力差异,为不同类型膝内翻提供生物力学理论基础。方法 招募26名单侧膝骨关节炎型膝内翻患者,股骨侧和胫骨侧来源各13名受试者。利用Noraxon MyoMotion三维动作捕捉系统和Footscan平板式足底压力测试系统,测量受试者在自然行走状态下的步态,采集受试者步态的时空指标、下肢各关节运动学参数、足底压力,并进行两组间对比分析。结果 胫骨侧膝内翻的膝关节屈伸范围、髌关节外展峰值、髌关节内收外展活动范围、踝关节内旋峰值均大于股骨侧膝内翻,而膝关节屈曲峰值、髌关节内收峰值小于股骨侧膝内翻;与股骨侧膝内翻相比,胫骨侧膝内翻受试者第4、5跖骨足底受力时间、压力峰值都增加($P < 0.05$)。在第3跖骨区域中,股骨侧肢体比胫骨侧肢体的冲量更大;而在足跟内侧区域,股骨侧肢体的冲量更小($P < 0.05$)。结论 两种不同类型单侧膝内翻患者在运动学参数和足底压力方面存在一定差异。研究结果有助于正确认识膝内翻引起的异常步态,为不同类型膝内翻诊治、术后康复和肢体锻炼提供可靠参考。

关键词: 膝骨关节炎; 膝内翻; 运动学分析; 足底压力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.03.020

Kinematics and Plantar Pressure Analysis of Varus Femur and Varus Tibia

DAI Jing^{1,2}, MA Jianxiong^{2,3}, BAI Haohao^{2,3}, LU Bin^{2,3}, WU Yanfei^{1,2}, MA Xinlong^{1,2,3}

(1. Clinical College of Orthopedics, Tianjin Medical University, Tianjin 300203, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Orthopaedic Biomechanics and Medical Engineering, Tianjin 300050, China; 3. Institute of Orthopedics, Tianjin Hospital, Tianjin 300050, China)

Abstract: Objective To compare the differences in kinematic parameters and plantar pressures for two types of knee varus with tibial and femoral origins in gait analysis, so as to provide biomechanical theoretical basis for different types of genu varus. **Methods** Twenty-six patients with unilateral knee osteoarthritis (KOA) varus genu were enrolled, with 13 from femoral and 13 from tibial sources. Using Noraxon MyoMotion three-dimensional (3D) motion capture system and Footscan plantar pressure test system, the gait of the subjects during natural walking was measured, the temporal and spatial parameters of the gait, the kinematics parameters of lower limb joints and plantar pressures were collected, to make comparative analysis between the two groups. **Results** The range of knee flexion and extension of tibial varus, the peak of hip abduction, the range of motion (ROM) of hip adduction and abduction and the peak of ankle pronation were larger than those of femoral lateral genu varus.

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772226, 81871777, 81572154), 天津市科技计划项目(18PTLCSY00070, 16ZXZNGX00130)

通信作者: 马信龙, 教授, 博士生导师, E-mail: maxinlong8686@sina.com

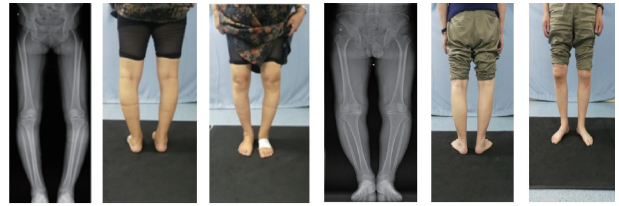
The peak of knee flexion and hip adduction was smaller than that of femoral lateral genu varus. Compared with femoral varus, subjects with tibial varus had increased stress time and peak pressure on the plantar of the 4th and 5th metatarsals ($P < 0.05$). In the 3rd metatarsal region, the impulse of healthy femoral limb was greater than that of healthy limb with tibial deformity. While in the medial calcaneal region, the impulse of healthy femoral limb was smaller ($P < 0.05$). **Conclusions** There are some differences in kinematic parameters and plantar pressures between two different types of unilateral genu varus patients. The results of this study are helpful to understand the abnormal gait caused by genu varus, and provide reliable references for postoperative rehabilitation and limb exercise for different types of genu varus.

Key words: knee osteoarthritis; knee varus; kinematics analysis; plantar pressure

膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是一种常见于中老年人关节软骨退行性改变为主的全球性疾病,以膝关节疼痛、关节软骨丧失、关节僵硬、硬化和骨赘为特征^[1]。根据全球疾病负担(global burden of disease, GBD)研究,骨关节炎是所有年龄段疾病负担的第12大主要原因。由于发生KOA的患者数量巨大,中国KOA疾病负担已位居全球首位^[2]。流行病学调查显示,中国有13亿多人口,其中8.1%人群被医生诊断为有症状的KOA^[3];而我国40岁以上人群原发性骨关节炎患病率高达46.3%,且随着年龄增长而增高^[4]。KOA晚期患者常伴有膝关节畸形,其中以冠状面上的内外翻畸形常见;与此同时,内翻畸形的发生会进一步加重KOA的进展^[5]。

膝关节冠状面上的畸形可以通过“力线偏移测试”进行评估。力线偏移是下肢力学轴偏差(mechanical axial deviation, MAD)的表现。下肢力线与膝关节的交点相比膝关节中心向内偏移超过 (4 ± 2) mm,即表示下肢存在内翻畸形。当发生严重膝内翻力线偏移时,力学轴相对于膝关节中心偏移超过15 mm^[6]。为了明确力线偏移的来源,即探究畸形来源于股骨侧还是胫骨侧,需要分析股骨远端外侧机械角(mechanical lateral distal femur angle, mL DFA, mL DFA)和胫骨近端内侧机械角(mechanical medial proximal tibial angle, mMP TA)是否异常。若 $mMP TA < 87^\circ \pm 3^\circ$,则考虑胫骨来源畸形;若 $mL DFA > 87^\circ \pm 3^\circ$,则表明内翻畸形是股骨来源所致^[7](见图1)。

目前临床上主要是以胫骨侧来源的膝内翻的更为常见,股骨来源的膝内翻患者较少。对于膝内翻步态分析的研究更多着眼于和正常健康人的比



(a) 胫骨内翻畸形(右侧) (b) 股骨内翻畸形(右侧)

图1 不同内翻畸形的双下肢全长正位片和站立姿态

Fig. 1 Full-length anteroposterior radiographs of lower limbs and standing posture in different varus malformations
(a) Varus deformity of tibia (right), (b) Varus femur deformity (right)

较,而膝内翻不同类型的步态特征差异尚不明确。本文对膝内翻受试者术前运动学参数和足底压力进行比较,探究两种骨性结构畸形来源的膝内翻步态特征,为膝内翻的诊断、治疗、康复锻炼提供重要的理论依据。

1 资料和方法

1.1 实验对象

研究对象分为股骨侧组和胫骨侧组,选择单侧KOA膝内翻患者共26例,其中股骨侧膝内翻患者13例(8名女性,5名男性),胫骨侧膝内翻患者13例(8名女性,5名男性),两组受试者身高、年龄、体质量和身体质量指数(body mass index, BMI)均差异无统计学意义($P > 0.05$),见表1。

纳入标准:①查体和影像学诊断为单侧膝关节内侧间室骨关节炎合并膝内翻;②内翻畸形超过 3° ,胫骨侧患者 $mMP TA < 87^\circ \pm 3^\circ$,股骨侧患者 $mL DFA > 87^\circ \pm 3^\circ$,无胫股双侧同时内翻畸形;③按照骨关节炎影像学Kellgren-Lawrence分级 \geq II级;④年龄40~70岁,可独立正常行走;⑤膝关节外侧

表 1 受试者基本资料

Tab. 1 Basic information of the subjects

| 项目 | 胫骨侧($n=13$) | 股骨侧($n=13$) |
|---------------------------------------|---------------|---------------|
| 性别(男:女) | 5:8 | 5:8 |
| 身高/cm | 161.84±7.94 | 162.76±9.08 |
| 年龄/岁 | 58.34±6.74 | 56.23±7.23 |
| 体质量/kg | 73.65±15.76 | 72.53±12.41 |
| BMI/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) | 27.72±4.32 | 27.25±3.14 |

间室半月板及软骨功能正常。排除标准:①既往有类风湿性关节炎、膝外翻、肿瘤、足踝等相关疾病;②合并精神疾病或认知功能障碍;③既往下肢外伤史(下肢骨折、外侧半月板损伤、韧带损伤等)、下肢手术史;④膝关节外侧间室骨关节炎或多间室骨关节炎。

1.2 测试设备

使用 Noraxon MyoMotion 三维运动捕捉系统(Noraxon 公司,美国)和 Footscan 足底压力分析系统(RSsaen 公司,比利时)进行测试,采集数据。

MyoMotion 三维运动捕捉系统通过传感器建立人体三维模型,从而获得人体髌膝踝等各个关节运动角度、角速度和肢体本身的运动方向角^[8]。该系统由多个惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、1 个信号接受器和 1 个采集与分析软件模块组成,其系统原理包括 IMU 九轴惯性传感器、三轴加速度计、陀螺仪和磁强计等。系统采样频率为 100 Hz,在受试者运动过程中,系统实时同步采集多个平面的运动数据,并通过无线传感器传入电脑软件进行步态分析。

Footscan 足底压力测试系统包括 1 个数据采集盒、2 m 长测力平板和电脑软件。测力平板尺寸为 2 093 mm×469 mm×18 mm,内含 16 384 个传感器,系统采集数据的频率设定为 126 Hz^[9]。系统将受试者足底分为 10 个区域(见图 2)。

1.3 测试流程

①足底压力测量:测试前告知受试者注意事项以及步骤,在正式测试前进行简单的行走预热,以适应实验环境。测试时,要求受试者以正常自然行走的状态在 2 m 长测试平板上行走数个来回,采集足底压力相关数据。②运动学参数测量:首先,将传感器用绑带分别固定在受试者骶骨、双侧股骨外侧、双侧胫骨外侧以及双侧足背部。测试前,受试者以直立

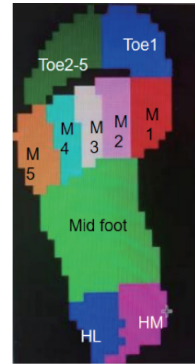


图 2 足底压力分区

Fig. 2 Plantar pressure zone

注:Toe1 为第 1 趾骨,Toe2~5 为第 2~5 趾骨,M1~5 分别为第 1~5 跖骨,Mid foot 为足中部,HL、HM 分别为足跟内、外侧。

位静止站立在校准点处 10 s 进行姿态的校准;随后在实验人员的口令下,同样以正常自然的状态下来回行走数个回合,系统实时采集相关数据。

1.4 测试指标

①时间-空间参数:包括受试者步态中的步速、步长、步宽、步态周期、单支撑期和双支撑期;②运动学参数:髌关节屈曲伸展角度、髌关节外展内收角度、膝关节屈伸角度、踝关节背屈跖屈角度、踝关节内外翻角度、踝关节内外旋角度;③足底压力参数:足底各个区域受力时间、冲量、压力峰值。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 25.0 软件(SPSS 公司,美国)进行数据分析。采用 Shapiro-wilk 检验对数据进行正态性检验。正态分布的计量资料用均数±标准差表示,两组间比较采用独立 t 检验;非正态分布的计量资料以 4 分位间距[M(P_{25} , P_{75})]表示,两组间比较采用秩和检验;计数资料比较采用 Fisher 确切概率法。 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组间时空指标比较

两组间步长、步宽、步速、步态周期、单足支撑期、双足支撑期比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),见表 2。

2.2 运动学参数

两组间膝关节屈曲峰以及最大膝关节屈曲活动范围比较,差异有统计学意义($P<0.05$),而膝关

表2 两组受试者时空指标比较

Tab. 2 Comparison of spatio-temporal parameters between two groups

| 参数 | 胫骨侧(n=13) | 股骨侧(n=13) |
|-------------------------|-------------|-------------|
| 步宽/cm | 14.79±6.74 | 15.95±6.10 |
| 步长/cm | 37.93±14.60 | 41.99±7.01 |
| 步速/(m·s ⁻¹) | 0.915±0.170 | 0.923±0.310 |
| 步态周期/s | 1.44±0.19 | 1.43±0.21 |
| 单足支撑期/s | 0.40±0.03 | 0.41±0.03 |
| 双足支撑期/s | 0.28±0.09 | 0.29±0.12 |

表3 两组间下肢不同关节不同平面运动学参数比较

Tab. 3 Comparison of kinematic parameters of lower limb joints at different planes between two groups

| 关节 | 方向 | 参数/(°) | 胫骨侧(n=13) | 股骨侧(n=13) |
|----|-----|--------|-----------------------|-----------------------|
| 膝 | 矢状面 | 屈曲峰值 | 39.03±6.3* | 44.31±10.69* |
| | | 伸展峰值 | -5[-8.35,-1.97] | -3.54[-6.02,-2.01] |
| | | 最大活动范围 | 49.63±12.87* | 42.7±7.2* |
| 髋 | 矢状面 | 屈曲峰值 | 19.86[16.41,24.45] | 20.16[18.35,22.72] |
| | | 伸展峰值 | -9.63±5.03 | -7.97±3.94 |
| | | 最大活动范围 | 29.54±7.20 | 27.78±5.28 |
| 髋 | 冠状面 | 外展峰值 | 13.9±5.17* | 8.6±5.27* |
| | | 内收峰值 | -12.04[-18.07,-8.18]* | -6.41[-16.89,-3.36]* |
| | | 最大活动范围 | 27.21±6.73* | 7.83±6.75* |
| 踝 | 矢状面 | 背屈峰值 | 19.8[16.41,24.45] | 9.53[5.57,21.88] |
| | | 跖屈峰值 | -22.3[-33.7,-14.38] | -20.24[-31.39,-14.38] |
| | | 最大活动范围 | 36.28[30.52,46.25] | 31.67[23.08,53.21] |
| 踝 | 冠状面 | 外翻峰值 | 3.93[-0.79,8.02] | 5.8[-0.75,10.46] |
| | | 内翻峰值 | -16.07[-22.57,-7.98] | -13.13[-17.32,-2.51] |
| | | 最大活动范围 | 17.26[12.64,25.03] | 15.62[10.79,19.38] |
| 踝 | 水平面 | 内旋峰值 | 28.29±14.97* | 17.62±15.28* |
| | | 外旋峰值 | -5.02[-10.03,-2.52] | -8.47[-22.36,-3.40] |
| | | 最大活动范围 | 32.41[23.69,48.80] | 29.49[22.17,37.84] |

注：*表示两组间运动学参数比较， $P<0.05$ 。

2.3 足底压力参数

足底受力时间：与股骨侧相比，胫骨来源膝内翻受试者第4跖骨和第5跖骨区域患侧肢体足底受力时间增加($P<0.05$)。冲量：在第3跖骨区域中股骨来源受试者的健侧肢体比胫骨来源受试者的健侧肢体的冲量更大，但是在足跟内侧区域股骨内翻的健侧肢体比胫骨内翻的健侧肢体的冲量更小($P<0.05$)。压力峰值：相较于股骨内翻畸形，胫骨内翻的患侧肢体在第4、5跖骨压力峰值更大($P<0.05$)，见表4。

3 讨论

本文采用三维动作捕捉系统对两个类型膝内翻进行多个平面的多个关节的运动学分析；同时利

用足底压力分析系统分析鉴别两者的足底差异。目前对于KOA膝内翻的研究多聚焦于膝关节运动，而对于相邻关节多个平面的分析较少。下肢运动链作为一个整体，膝关节的功能和运动不能独立于下肢其他部位^[10]。在正常情况下，各关节处于动态和静态的受力平衡，当某一关节出现正常衰老或损伤时，会影响整个机体运动的正常功能^[11]。对于人体复杂的关节运动，单纯根据某一关节行走时的活动幅度来评定关节是否正常不够全面，步态分析需要对整个步态周期的关节运动以及邻近关节相应的运动进行综合分析^[12]。

3.1 股骨内翻与胫骨内翻运动学参数

KOA膝内翻的发生经常会同时导致髋关节和踝关节的动力学和运动学的异常^[13]。本文结果表

表4 两组间足底压力参数

Tab. 4 Plantar pressure parameters between two groups

| 参数 | 分区 | 胫骨侧(<i>n</i> = 13) | | 股骨侧(<i>n</i> = 13) | |
|----------|--------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|
| | | 患侧 | 健侧 | 患侧 | 健侧 |
| 受力时间/% | 第1趾骨 | 65.69±19.8 | 65.15±26.71 | 68.15±28.08 | 60.90±21.48 |
| | 第2~5趾骨 | 57.93±27.27 | 39.00±21.31 | 52.07±27.73 | 53.15±23.39 |
| | 第1跖骨 | 76[59.5,81.5] | 81[48.5,84] | 80[75,84] | 79[75.5,84.5] |
| | 第2跖骨 | 82[80.5,88.5] | 82[68,86] | 84[80,85.5] | 83[77.5,86.5] |
| | 第3跖骨 | 84.69±4.28 | 81.53±7.35 | 84.15±6.97 | 84.53±4.01 |
| | 第4跖骨 | 86.84±5.71* | 82.46±2.93 | 76.46±16.41* | 83.61±5.65 |
| | 第5跖骨 | 83[79,89]* | 78[72,82] | 75[64.5,80.5]* | 78[62,82] |
| | 足中部 | 76.53±8.05 | 72.07±7.2 | 75.46±7.92 | 74.00±7.44 |
| | 足跟内侧 | 72±11.15 | 68.53±5.37 | 70.76±12.51 | 66.46±8.08 |
| | 足跟外侧 | 71.84±10.75 | 68.15±5.82 | 70.46±12.51 | 66.46±8.08 |
| 冲量/(N·s) | 第1趾骨 | 1.15[0.35,1.65] | 1.35[0.4,2.2] | 0.6[0.3,1.2] | 0.9[0.5,1.75] |
| | 第2~5趾骨 | 0.35[0.125,0.675] | 0.2[0.1,0.45] | 0.2[0.05,1.05] | 0.1[0.05,1.6] |
| | 第1跖骨 | 1.5[0.85,2.85] | 2[0.6,2.65] | 1.4[1,3.7] | 2.3[1.35,3.9] |
| | 第2跖骨 | 4.23±2.24 | 3.46±1.72 | 4.6±3.2 | 4.35±2.05 |
| | 第3跖骨 | 5.69±3.64 | 4.02±1.67 [#] | 4.4±2.82 | 5.95±2.81 [#] |
| | 第4跖骨 | 4.86±3.46 | 3.06±1.25 | 2.96±2.1 | 4.89±3.19 |
| | 第5跖骨 | 4.4[1,5.1] | 1.4[1,2.45] | 1.2[0.65,2.65] | 1.8[0.885,5.05] |
| | 足中部 | 2.04±1.49 | 1.47±0.75 | 1.66±0.78 | 1.5[0.95,2.55] |
| | 足跟内侧 | 4.66±2.29 | 5.63±3.35 [#] | 4.3[2.4,5.1] | 2.4[1.75,3.9] [#] |
| | 足跟外侧 | 4.45±1.98 | 4.13±1.57 | 2.8[2.25,4.45] | 2.20[1.95,4.55] |
| 压力峰值/N | 第1趾骨 | 65.59±49.69 | 68.35±54.42 | 64.53[21.25,115.22] | 58.42[39.86108.91] |
| | 第2~5趾骨 | 22.78[4.04,43.30] | 9.6[5.82,24.9] | 23.52[2.94,49.66] | 13.42[2.7,24.61] |
| | 第1跖骨 | 55.02[46.23,104.99] | 84[38.63,112.71] | 73.32[49.84,176.7] | 97.98[59.38,141.22] |
| | 第2跖骨 | 147.43±82.48 | 131.61±65.52 | 157.33±115.69 | 142.02±72.19 |
| | 第3跖骨 | 161.75±102.09 | 132.72±63.82 | 102.87±54.09 | 161.57±76.86 |
| | 第4跖骨 | 118.12±72.29* | 77.08[56.89,111.77] | 64.34±34.01* | 121.91±73.24 |
| | 第5跖骨 | 76.76[36.77,159.09]* | 48[39.43,77.96] | 30.72[19.38,65.92]* | 48[39.43,77.96] |
| | 足中部 | 203.07±130.71 | 169.04±80.41 | 172.94±79.54 | 145.52[107.38,323.64] |
| | 足跟内侧 | 186.65±88.77 | 248.15±126.15 | 179.15±98.03 | 114.92[97.5,184.04] |
| | 足跟外侧 | 160.11±77.7 | 157.13±51.21 | 118.32±45.09 | 96.38[77.65,173.26] |

注: *表示胫骨侧内翻和股骨侧内翻患侧比较, $P < 0.05$; [#]表示胫骨侧内翻和股骨侧内翻健侧比较, $P < 0.05$ 。

明,股骨内翻畸形的膝关节活动范围、髌关节外展峰值、髌关节内收外展活动范围更小,而膝关节屈曲峰值和髌关节内收峰值更大。股骨作为髌膝关节的重要组成部分,当膝内翻是由于股骨形成时,同时也会倾向于改变髌关节内部生物力学性质,而胫骨以及踝关节的生物力学性质变化并不明显。因此,本文建议对于股骨内翻的患者可以采用股骨远端外侧闭合截骨术纠正下肢力线,而胫骨内翻畸形则可采用胫骨高位闭合截骨术纠正力线偏移。Yamada等^[14]认为,髌关节周围肌肉可能具有在发生膝内翻时稳定膝关节的能力,并且随着KOA的进展,髌关节内收肌和外展肌会代偿性增强,以便于对骨盆保持稳定以及控制膝内翻畸形。创伤后

KOA患者的髌关节屈曲角度以及冠状面的运动学和动力学都会发生相应的改变^[15]。

在临床上,医生发现许多胫骨侧膝内翻患者在治疗前可能会出现持续的足踝疼痛^[16]。当膝关节生物力学发生改变时,处在同一运动链上的踝关节的平衡和生物力学特性也会发生改变^[17]。周恩昌等^[18]研究发现,膝内翻不仅影响膝关节的应力分布,而且会出现胫距关节峰值应力增大、外移,足底部出现代偿性外翻,诱发创伤性关节炎及扁平足。本文发现,胫骨侧膝内翻表现出更大的踝关节内旋角度。研究表明,内侧间室KOA患者出现足踝部内旋现象,可以降低最初着地期的膝关节内收力矩峰值和伸膝力矩峰值^[19]。同时,KOA甚至会降低老

年人踝关节策略平衡动态能力,增加前后跌倒的风险概率^[20]。

Bae 等^[21]研究认为,相较于踝关节的代偿,距下关节对膝内翻畸形的补偿起着主要作用,而踝关节的代偿作用并不明显。该结果与本研究两组踝关节各平面运动中仅踝关节内旋运动有统计学差异的结果一致。距下关节的代偿可能使得 KOA 膝内翻患者早期并不会出现踝关节功能障碍。但是距下关节的代偿功能是有限的,一旦内翻畸形程度超过其可代偿的力度,患者就会出现足踝部不适^[22]。Norton 等^[23]对距下关节的研究中发现,距下关节对线与膝关节畸形存在显著相关性,研究发现膝内翻角度每增加 1°,距下关节外翻增加 0.49°。

3.2 股骨内翻与胫骨内翻足底压力

膝内翻患者由于距骨和跟骨的改变,代偿不仅发生在踝关节和距下关节,而且足部也发生了很大程度的代偿^[24]。本文对两种不同类型膝内翻患者进行足底压力的分析。结果表明,两组膝内翻之间足底压力的差异主要集中在第 4、5 跖骨区域。与胫骨侧膝内翻患者相比,股骨内翻患侧肢体在第 4、5 跖骨区域足底压力受力时间更短,压力峰值更小。本文推测,这与保持行走稳定性,加快重心转移至对侧肢体或调节骨盆倾斜度,保持重心在正常水平或支撑期各个时相重新分配有关^[25];同时,也意味着胫骨内翻患侧肢体足底外侧弓承受更多的继发性损伤。张永祥等^[26]指出,KOA 患者足底压力会向足外侧重新分布,并且这种趋势会随 KOA 病情的进展逐渐明显。

4 结论

胫骨内翻和股骨内翻的运动学参数和足底压力存在显著性差异。运动学上主要体现在股骨内翻在髌关节内收外展运动更为受限,踝关节运动可能由于距下关节的代偿功能而无明显差异;足底压力差异主要集中在第 4、5 跖骨区域胫骨内翻畸形承受更大的压力和更长的受力时间。这些生物力学差异性可能与肢体运动链代偿机制有关。本研究结果有助于进一步认识膝内翻生物力学特征,为不同类型的膝内翻诊治、术后康复、肢体锻炼提供参考。

参考文献:

- [1] HUNTER DJ, BIERMA-ZEINSTRAS S. Osteoarthritis [J]. *Lancet*, 2019, 393(10182): 1745-1759.
- [2] Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 328 diseases and injuries for 195 countries, 1990-2016: A systematic analysis for the global burden of disease study 2016 [J]. *Lancet*, 2017, 390(10100): 1211-1259.
- [3] TANG X, WANG S, ZHAN S, *et al.* The Prevalence of symptomatic knee osteoarthritis in China: Results from the china health and retirement longitudinal study [J]. *Arthritis Rheumatol*, 2016, 68(3): 648-653.
- [4] 薛庆云,王坤正,裴福兴,等. 中国 40 岁以上人群原发性骨关节炎患病状况调查[J]. *中华骨科杂志*, 2015, 35(12): 1206-1212.
- [5] SHARMA L. The role of varus and valgus alignment in knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Rheum*, 2007, 56(4): 1044-1047.
- [6] PALEY D, PFEIL J. Principles of deformity correction around the knee [J]. *Orthopade*, 2000, 29(1): 18-38.
- [7] LOBENHOFFER PP, HEERWAARDEN RJV, STAUBLI AE, *et al.* 膝关节周围截骨[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2019.
- [8] 高明明,何泽佳,恽晓萍,等. Gaitboter 与 Noraxon 步态分析系统时空参数的一致性比较[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(2): 216-221.
- [9] 王子坚,闫松华,李伟,等. 单侧膝内翻型膝骨关节炎患者足底压力分布特征研究[J]. *北京生物医学工程*, 2019, 38(2): 151-158.
- [10] BENNELL KL, HUNT MA, WRIGLEY TV, *et al.* The effects of hip muscle strengthening on knee load, pain, and function in people with knee osteoarthritis: A protocol for a randomised, single-blind controlled trial [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2007, 8: 121.
- [11] 马青川,肖丽英,李志昌,等. 单侧全膝关节置换术后两下肢受力不对称性的影响因素[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(1): 89-93.
MA QC, XIAO LY, LI ZC, *et al.* Factors affecting asymmetrical lower extremity loading after unilateral total knee arthroplasty [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(1): 89-93.
- [12] 戴魁戎,汤荣光. 平地常速行走时的步态观察[J]. *中国生物医学工程学报*, 1982, 1(1): 15-21.
- [13] KWON SB, KU Y, HAN HS, *et al.* Author Correction: A machine learning-based diagnostic model associated with knee osteoarthritis severity [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 2929.

- [14] YAMADA H, KOSHINO T, SAKAI N, *et al.* Hip adductor muscle strength in patients with varus deformed knee [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2001(386): 179-185.
- [15] WELLSANDT E, ZENI JA, AXE MJ, *et al.* Hip joint biomechanics in those with and without post-traumatic knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament injury [J]. *Clin Biomech*, 2017, 50: 63-69.
- [16] OKAMOTO Y, OTSUKI S, JOTOKU T, *et al.* Clinical usefulness of hindfoot assessment for total knee arthroplasty: Persistent post-operative hindfoot pain and alignment in pre-existing severe knee deformity [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2017, 25(8): 2632-2639.
- [17] LEE JH, JEONG BO. Radiologic changes of ankle joint after total knee arthroplasty [J]. *Foot Ankle Int*, 2012, 33(12): 1087-1092.
- [18] 周恩昌, 葛英林, 侯广武, 等. 膝内翻对踝关节接触特征影响的有限元分析[J]. *临床骨科杂志*, 2016, 19(4): 504-507.
- [19] SIMIC M, WRIGLEY TV, HINMAN RS, *et al.* Altering foot progression angle in people with medial knee osteoarthritis: The effects of varying toe-in and toe-out angles are mediated by pain and malalignment [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2013, 21(9): 1272-1280.
- [20] 游永豪, 卢桂兵, 邵梦霓, 等. 双膝骨关节炎对女性老年人踝关节策略动态平衡能力的影响[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(3): 459-464.
- YOU YH, LU GB, SHAO MN, *et al.* Effects of bilateral knee osteoarthritis on dynamic balance ability of ankle strategy in aged women [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(3): 459-464.
- [21] BAE JY, SEO DK, CHO HK, *et al.* Effect of lower-extremity angular imbalance on foot and ankle pain in patients with genu varus deformity [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2020, 59(4): 743-747.
- [22] 吴子光, 何君源, 唐剑邦, 等. 胫骨内侧开放楔形截骨术对膝内翻患者踝关节的影响[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2021, 29(11): 18-23.
- [23] NORTON AA, CALLAGHAN JJ, AMENDOLA A, *et al.* Correlation of knee and hindfoot deformities in advanced knee OA: compensatory hindfoot alignment and where it occurs [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2015, 473(1): 166-174.
- [24] JEONG BO, KIM TY, BAEK JH, *et al.* Following the correction of varus deformity of the knee through total knee arthroplasty, significant compensatory changes occur not only at the ankle and subtalar joint, but also at the foot [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018, 26(11): 3230-3237.
- [25] 夏清, 袁海, 曹娟娟. 膝骨性关节炎患者膝关节疼痛指数与足底压力变化的相关性研究[J]. *安徽医学*, 2015, 36(11): 1358-1360.
- [26] 张永祥, 张文洁, 邵战海. 膝关节骨性关节炎患者足底压力分布规律分析[J]. *中华临床医师杂志(电子版)*, 2012, 6(11): 2955-2958.