

文章编号: 1004-7220(2021)04-0625-08

# 三踝骨折术后患者不同步行状态时的足底压力特征

朱婷<sup>1</sup>, 王雅<sup>1</sup>, 林金鹏<sup>1</sup>, 王文锦<sup>1</sup>, 仲荣洲<sup>2</sup>, 翟华<sup>2</sup>, 王少白<sup>1</sup>

(1. 上海体育学院运动科学学院, 上海 200438; 2. 同济大学附属上海市养志康复医院(上海市阳光康复中心), 上海 201619)

**摘要:**目的 比较三踝骨折术后患者不同步行状态下患侧和健侧足底压力特征, 并与健康受试者进行对比。方法 对12例三踝骨折术后恢复期患者和23例健康受试者不同步行状态的足底压力特征进行测试, 包括足底10个区域峰值压强、接触面积、接触时间百分比。**结果** 患侧与健侧对比: 平地步行时患侧第3~5趾骨区域峰值压强小于健侧, 患侧中足区域接触面积小于健侧; 内翻斜面时, 患侧第3~5趾骨区域峰值压强、接触面积小于健侧; 外翻斜面时, 患侧第3~5趾骨区域峰值压强、接触面积、接触时间百分比小于健侧, 后足区域峰值压强显著大于健侧。患者与健康受试者对比: 在3种步行状态下, 患者第2、第3跖骨以及第2、第3~5趾骨区域峰值压强均小于正常者, 患者第1、第2、第3~5趾骨区域接触面积均小于正常者, 患者第2、第3~5趾骨接触时间百分比小于正常者, 中足、后足接触时间百分比大于正常者。**结论** 三踝骨折术后患者双侧足底压力特征存在不对称性。与正常者对比, 患者在步行支撑相的足底压力异常。患者在外翻斜面运动控制能力、稳定性较正常者有所下降。外翻斜面的足底压力测试能够用于评估患者踝功能。

**关键词:** 三踝骨折; 足底压力; 踝关节内翻; 踝关节外翻

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.04.019

## Plantar Pressure Features under Different Walking Conditions in Patients after Trimalleolar Fracture Surgery

ZHU Ting<sup>1</sup>, WANG Ya<sup>1</sup>, LIN Jinpeng<sup>1</sup>, WANG Wenjin<sup>1</sup>, ZHONG Rongzhou<sup>2</sup>, ZHAI Hua<sup>2</sup>, WANG Shaobai<sup>1</sup>

(1. School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. Shanghai Yangzhi Rehabilitation Hospital (Shanghai Sunshine Rehabilitation Center), Tongji University School of Medicine, Shanghai 201619, China)

**Abstract: Objective** To analyze plantar pressure features of patients in injured and healthy sides of the lower limbs under different walking conditions after the trimalleolar fracture surgery, and compare these characteristics with healthy subjects. **Methods** Twelve Trimalleolar fracture patients and twenty-three healthy subjects were recruited and their plantar pressure characteristics under different walking conditions were tested, including peak pressure, contact area and contact time percentage. **Results** Comparison between injured and healthy sides: during level walking, peak pressure of the 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> toe in the injured feet were smaller than those in the healthy sides; in inversion position, peak pressure and contact area of the 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> toe area in the injured feet were smaller than those in the healthy side; in eversion position, peak pressure, contact area and contact time of the 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> toe in the injured feet were smaller than those in the healthy sides, and peak pressures of the hindfoot area were

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-10-01

基金项目: 科技部重点研发计划(2018YFF0300504), 国家自然科学基金项目(81702211), 上海市进一步加快中医药事业发展三年行动计划2018~2020年(ZY(2018-2020)-FWTX-8016), 上海市残疾人康复科研项目(K2018024)

通信作者: 王少白, 教授, 博士生导师, E-mail: wangs@innomotion.biz

larger than those in the healthy sides. Comparison between patients and healthy subjects: under three kinds of walking conditions, peak pressures of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> metatarsus bones, the 2<sup>nd</sup> toe, the 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> toe, contact area of the 1<sup>st</sup>-5<sup>th</sup> toe and contact time percentage of the 2<sup>nd</sup> toe, the 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> toe area were all smaller than those of healthy subjects, while contact time of the hindfoot and mid-foot area were all smaller than those of healthy subjects. **Conclusions** The plantar pressure characteristics of Trimalleolar fracture patients were asymmetrical. Compared with healthy subjects, the plantar pressure features of patients were abnormal during stance phase. Compared with healthy subjects, the motor control ability and stability of patients in eversion positions were decreased. The plantar pressure characteristics at ankle eversion can be used to evaluate ankle joint function.

**Key words:** trimalleolar fracture; plantar pressure; ankle inversion; ankle eversion

按照骨折数量可以将踝关节骨折分为单踝、双踝和三踝骨折,三踝骨折是指内踝、外踝、胫骨远端后缘向下方延伸而形成的后踝均发生骨折<sup>[1-2]</sup>。研究表明,三踝骨折的发生率呈上升趋势,术后大部分患者存在残留疼痛、僵硬、肿胀等症状,并且无法重返体育运动。

三踝骨折术后患者踝关节稳定性、机体运动控制能力以及步行功能如何变化尚不清楚。目前三踝骨折术后临床疗效、功能评估主要采用医学影像、关节活动度、量表等方法,但这些评估方法不能较全面、客观、准确地反映其关节稳定性和运动控制能力<sup>[3-4]</sup>。从生物力学角度出发,可以通过足底压力、运动捕捉、表面肌电等手段实现对踝关节功能客观量化和全面细微的评估。足底压力测试能够较好评估人体站立状态下的稳定性和运动控制能力,常用指标包括接触面积、峰值应力、足底压力中心轨迹等<sup>[5-7]</sup>。

研究表明,对受试者在不平坦、不稳定平面进行稳定性、运动控制研究将能更合理地探究动态平衡状态、控制机理及变化规律<sup>[8]</sup>。目前已有学者对不同步行状态(平地、内翻斜面、外翻斜面)下踝关节运动控制、身体姿势调控的特点进行相关研究,研究对象包括健康受试者、慢性踝关节不稳患者、距下关节融合患者等,但是有关三踝骨折术后患者在不同状态下的踝关节运动特征还鲜有报道<sup>[6,9-11]</sup>。三踝骨折患者由于内踝、外踝和后踝结构均受到破坏,其踝穴、距上关节的稳定性可能有所降低。因此,探究三踝骨折术后患者在不同状态下的踝关节运动控制和稳定性,能够更全面、客观地评估其踝关节的运动功能。

本文针对三踝骨折术后患者在平地、内翻斜

面、外翻斜面3种不同步行状态下的足底压力特征进行自身患侧、健侧对比,并以健康受试者做为对照,探究三踝骨折术后足底压力的分布特征,进而分析其踝关节稳定性和运动控制能力的变化,能够更全面、客观地探究三踝骨折术后踝关节的运动功能特点,可以针对性地为术后康复提供更有效、精确的理论指导,有助于提高康复效益。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本实验于2018年12月~2019年6月在上海市阳光康复中心进行,招募选取12例单侧三踝骨折术后恢复期患者为实验组,23例健康受试者为对照组。实验组要求纳入18~60岁单侧三踝骨折术后恢复期患者,能够不借助辅助具独立步行,暂未接受踝关节针对性的康复治疗;对照组要求受试者身体健康,无踝关节损伤史、手术史,近1年未受过踝关节运动控制训练,足部形态正常。所有受试者在实验开始前已了解实验内容且自愿签署知情同意书。本研究已通过上海市阳光康复中心医学伦理委员会审查批准。受试者基本情况见表1。

表1 受试者基本信息

Tab.1 Basic characteristics of subjects

参数	实验组 (n=12)	对照组 (n=23)	P
年龄/岁	41.2±10.2	34.9±13.7	0.195
身高/cm	164.3±7.4	167.1±7.8	0.424
体质量/kg	63.9±8.6	65.8±7.9	0.614
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	23.6±2.3	23.4±1.3	0.887
性别(男/女)	6/6	13/10	0.736
患侧/优势腿(右/左)	7/5	23/0	
术后时间/月	4.8(3~7)		

注: BMI (body mass index), 身体质量指数。

## 1.2 测试方法

采用简易定制走道和足底压力测试平板进行测试,所用设备与本实验前期研究一致<sup>[12]</sup>。如图1所示,走道由1个斜坡和4个平台组合、搭建而成,斜坡位于走道正中位置。斜坡为梯形体,倾斜角度 $10^\circ$ (通过预实验和相关文献[6,9]决定倾斜角度),边缘安装一长木条以保证足底压力测试平板可置于斜坡上而不下滑。Emed<sup>®</sup> -x 400 足底压力系统(Novel GmbH 公司,德国)采集频率为100 Hz,测力板面积为 $0.7\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ ,压力传感器密度为 $4\text{ 个}/\text{cm}^2$ 。

如图2所示,每位受试者分别随机进行平地、内翻斜面、外翻斜面的动态足底压力测试,先进行2次预测试以适应测试环境,正式测试时行走5个来回,要求采用自然步态、赤足、目视前方。配套Novel 软件根据每只脚的5次测试结果自动生成平均足底压力分布特征,每侧足部划分为10个区域:

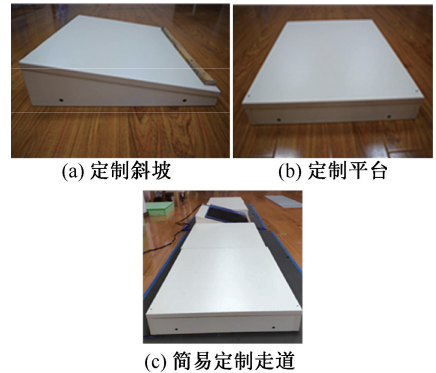


图1 简易定制走道

Fig.1 Custom-designed walkways (a) Custom-designed inclined board, (b) Custom-designed platform, (c) Custom-designed walkways

足跟(HF)、中足(MF)、第1~5跖骨(M1~5)、踇指(T1)、第2趾骨(T2)、第3~5趾骨(T3~5)。测试指标为足底各区域峰值压强、接触面积、接触时间百分比。

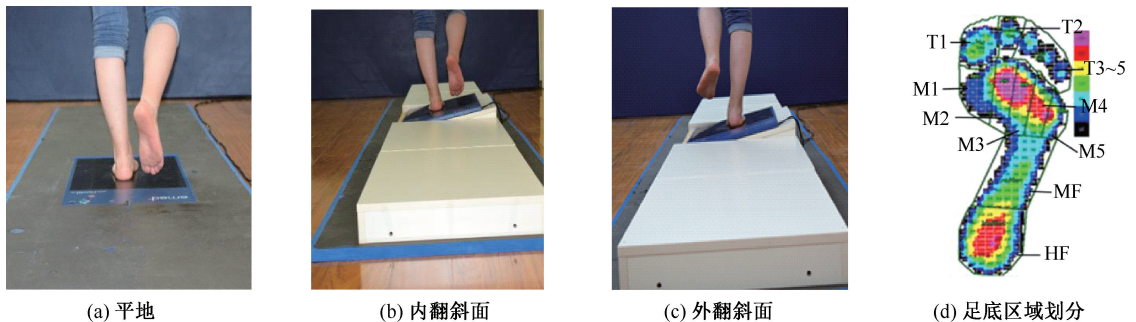


图2 踝足底压力测试和足底区域划分

Fig.2 Plantar pressure test of ankle and division of plantar regions (a) Level walking, (b) Ankle inversion, (c) Ankle eversion, (d) Plantar region division

## 1.3 统计学分析

采用SPSS 23.0 和 Microsoft Excel 2016 进行数据处理,计量资料用均数 $\pm$ 标准差表示。首先采用单个样本 K-S 检验(Kolmogorov Smirnov)检验数据是否符合正态分布,经检验本研究数据均符合正态分布。

对实验组在平地、内翻斜面、外翻斜面的患侧和健侧足底压力特征均进行配对样本  $t$  检验;对实验组和对对照组的足底压力特征进行独立样本  $t$  检验,包括平地、内翻斜面、外翻斜面3种状态。 $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 不同步行状态时患侧、健侧足底压力特征对比

患者平地步行时双侧足底压力特征如表2所示。其中患侧 T3~5 区域的峰值压强( $P = 0.022$ )、MF 区域的接触面积( $P = 0.038$ )显著小于健侧,其余区域足底压力特征无显著性差异。

患者在内翻斜面的双侧足底压力特征如表3所示。其中,患侧 T3~5 区域的峰值压强( $P = 0.027$ )、接触面积( $P = 0.030$ )显著小于健侧,其余区域足底压力特征无显著性差异。

表2 平地步行时患侧和健侧足底压力特征对比

Tab.2 Comparison of plantar pressure features between affected and unaffected limbs during level walking

区域	峰值压强/kPa		接触面积/cm <sup>2</sup>		接触时间占比/%	
	患侧	健侧	患侧	健侧	患侧	健侧
HF	283.72±57.69	294.54±55.69	28.48±3.07	28.81±2.98	71.06±7.18	67.11±9.17
MF	132.36±33.86	131.18±36.35	22.60±5.64 <sup>a</sup>	25.87±7.90	72.18±7.22	73.69±6.68
M1	221.18±199.73	219.36±102.21	11.20±2.24	11.85±3.31	79.97±9.04	85.47±5.67
M2	281.72±152.60	427.45±181.50	9.05±1.23	9.72±2.17	85.32±6.57	88.34±4.88
M3	289.63±138.24	409.81±187.48	9.97±1.40	10.42±1.89	86.76±6.68	89.02±4.62
M4	198.00±95.62	229.72±86.82	7.97±1.04	8.25±1.21	83.40±6.60	86.90±4.96
M5	137.54±74.07	143.90±68.72	5.03±0.58	5.13±0.73	76.60±6.32	78.36±5.20
T1	303.00±295.53	402.90±192.98	7.45±2.31	9.20±2.07	75.26±20.24	79.97±14.81
T2	84.09±80.38	139.81±110.40	2.25±1.37	2.87±1.09	43.78±20.71	61.17±21.76
T3~5	44.63±32.18 <sup>a</sup>	112.27±79.12	2.81±2.17	4.68±2.83	42.57±26.22	60.22±28.32

注:<sup>a</sup>患侧与健侧比较, $P<0.05$ 。

表3 内翻斜面步行时患侧和健侧足底压力特征对比

Tab.3 Comparison of plantar pressure features between affected and unaffected limbs at ankle inversion position

区域	峰值压强/kPa		接触面积/cm <sup>2</sup>		接触时间占比/%	
	患侧	健侧	患侧	健侧	患侧	健侧
HF	290.95±54.45	288.72±63.19	27.51±3.40	28.57±3.86	75.96±11.90	74.63±9.35
MF	127.68±39.75	131.22±36.50	19.43±7.90	22.87±12.90	75.50±9.75	76.90±10.14
M1	253.00±138.61	284.68±126.17	11.43±2.03	12.06±2.99	88.78±5.04	90.83±4.54
M2	226.22±144.40	321.90±155.02	9.08±1.44	9.41±1.69	88.22±5.02	91.30±4.60
M3	245.45±147.56	329.27±160.96	9.87±1.30	10.05±1.54	88.91±4.69	91.22±4.41
M4	192.50±113.27	197.22±72.67	8.20±0.95	8.07±1.05	86.23±4.66	88.47±5.54
M5	125.22±72.11	127.50±62.06	5.04±0.54	5.03±0.63	76.69±8.86	80.98±7.14
T1	300.18±286.80	356.68±166.81	6.95±2.40	8.63±1.96	79.87±15.78	86.53±8.95
T2	79.27±81.91	148.40±119.97	2.23±1.45	2.69±1.08	53.19±32.38	69.05±15.82
T3~5	61.09±60.13 <sup>a</sup>	129.04±105.73	2.86±2.19 <sup>a</sup>	5.36±3.17	49.75±34.83	64.50±31.30

注:<sup>a</sup>患侧与健侧比较, $P<0.05$ 。

患者在外翻斜面的双侧足底压力特征如表4所示。其中,患侧T3~5区域的峰值压强( $P=0.024$ )、接触面积( $P=0.022$ )、接触时间百分比( $P=0.014$ )均显著小于健侧,HF区域接触时间百分比( $P=0.011$ )显著大于健侧,其余区域足底压力特征无显著性差异。

## 2.2 与健康受试者的足底压力特征对比

两组足底各区域峰值压强的对比结果见表5。在不同步行状态,患者M2、M3、T2、T3~5区域的峰值压强均显著小于对照组。在平地时,患者HF( $P=0.003$ )、M2( $P<0.001$ )、M3( $P=0.001$ )、M4( $P=0.04$ )、M5( $P=0.027$ )、T2( $P<0.001$ )、T3~5区域( $P=0.001$ )的峰值压强显著小于对照组。在内翻斜面时,患者M1( $P=0.001$ )、M2( $P=0.003$ )、

M3( $P=0.015$ )、T2( $P<0.001$ )、T3~5区域( $P=0.001$ )的峰值压强显著小于对照组。在外翻斜面时,患者M1( $P=0.026$ )、M2( $P<0.001$ )、M3( $P<0.001$ )、M4( $P<0.001$ )、M5( $P=0.005$ )、T2( $P=0.001$ )、T3~5区域( $P<0.001$ )的峰值压强显著小于对照组。

两组足底各区域接触面积的对比结果见表6。3种步行状态时患者T1、T2、T3~5区域的接触面积均显著小于对照组,在外翻斜面时患者M1的接触面积显著小于对照组,其余区域没有显著差异。对两组的总接触面积进行对比发现,在外翻斜面患者总接触面积( $97.81±12.81$ ) cm<sup>2</sup>显著小于对照组( $112.12±13.53$ ) cm<sup>2</sup>, $P=0.006$ ;内翻斜面和平地步行时足部总接触面积均无显著差异。



表 4 外翻斜面步行时患侧和健侧足底压力特征对比

Tab.4 Comparison of plantar pressure features between affected and unaffected limbs at ankle eversion position

区域	峰值压强/kPa		接触面积/cm <sup>2</sup>		接触时间占比/%	
	患侧	健侧	患侧	健侧	患侧	健侧
HF	256.42±52.49	235.27±67.99	26.67±2.94	26.30±3.25	75.87±9.80 <sup>a</sup>	66.37±10.33
MF	131.72±34.11	123.04±43.11	21.61±4.41	23.13±7.86	77.22±6.27	73.34±12.18
M1	160.18±118.90	200.18±108.99	9.19±2.47	10.60±4.19	73.42±18.78	83.60±17.86
M2	239.07±163.44	364.31±169.92	8.13±1.14	8.97±2.25	86.50±7.74	89.59±6.34
M3	239.86±154.50	328.68±147.39	8.88±2.01	9.53±1.93	90.62±5.04	90.54±5.60
M4	198.77±120.33	210.18±61.22	7.39±1.44	7.55±1.31	89.35±6.21	88.86±6.03
M5	181.07±131.90	162.13±65.01	4.73±0.97	4.72±0.72	81.99±7.10	83.42±4.92
T1	363.21±296.64	439.95±270.35	7.07±2.49	8.92±2.04	79.09±21.76	88.96±8.18
T2	59.87±61.38	118.95±75.89	1.78±1.02	3.01±1.50	38.61±18.77	61.58±22.33
T3~5	43.00±30.83 <sup>a</sup>	124.95±93.80	2.34±2.18 <sup>a</sup>	4.86±2.40	47.60±27.69 <sup>a</sup>	71.14±18.56

注：<sup>a</sup>患侧与健侧比较， $P<0.05$ 。

表 5 两组峰值压强对比

Tab.5 Comparison of peak pressure for each plantar region in two groups

单位：kPa

区域	平地		内翻斜面		外翻斜面	
	实验组	对照组	实验组	对照组	实验组	对照组
HF	282.40±60.63 <sup>a</sup>	395.55±103.68	285.05±53.56	351.95±98.97	258.36±54.83	309.95±78.90
MF	132.10±35.68	137.71±52.64	121.70±36.31	117.94±40.10	131.65±35.96	148.91±69.66
M1	216.70±209.95	318.04±142.69	244.30±142.91 <sup>a</sup>	561.48±264.54	151.45±121.56 <sup>a</sup>	249.65±106.68
M2	265.40±150.39 <sup>a</sup>	640.84±272.44	215.60±147.61 <sup>a</sup>	478.18±237.50	211.98±143.91 <sup>a</sup>	559.08±240.22
M3	269.10±126.80 <sup>a</sup>	518.76±199.47	230.50±146.49 <sup>a</sup>	401.40±186.32	210.60±126.72 <sup>a</sup>	502.08±213.27
M4	180.90±81.15 <sup>a</sup>	254.29±54.18	178.25±108.50	221.54±54.51	181.65±111.82 <sup>a</sup>	331.91±96.34
M5	128.20±70.91 <sup>a</sup>	216.60±110.09	113.75±64.56	137.19±61.68	169.68±133.21 <sup>a</sup>	349.78±163.63
T1	298.70±311.16	424.89±168.73	299.20±302.29	443.52±175.10	359.78±417.92	485.52±186.45
T2	64.00±47.39 <sup>a</sup>	228.47±117.70	59.95±53.78 <sup>a</sup>	244.36±127.18	43.36±29.23 <sup>a</sup>	172.47±107.48
T3~5	39.00±27.61 <sup>a</sup>	152.61±89.68	61.20±63.38 <sup>a</sup>	185.89±94.31	37.55±26.33 <sup>a</sup>	184.69±111.08

注：<sup>a</sup>实验组与对照组比较， $P<0.05$ 。

表 6 两组接触面积对比

Tab.6 Comparison of contact area for each plantar region in two groups

单位：cm<sup>2</sup>

区域	平地		内翻斜面		外翻斜面	
	实验组	对照组	实验组	对照组	实验组	对照组
HF	28.48±3.07	29.94±3.39	27.51±3.40	29.08±3.29	26.67±2.94	27.50±3.52
MF	22.60±5.64	22.59±8.06	19.43±7.90	19.03±9.87	21.61±4.41	21.55±5.76
M1	11.20±2.24	11.77±1.51	11.43±2.03	12.14±1.36	9.19±2.47 <sup>a</sup>	11.20±1.49
M2	9.05±1.23	8.98±1.29	9.08±1.44	8.75±1.24	8.13±1.14	8.79±1.05
M3	9.97±1.40	10.08±1.16	9.87±1.30	9.45±1.17	8.88±2.01	9.66±1.30
M4	7.97±1.04	8.54±0.81	8.20±0.95	8.05±0.84	7.39±1.44	8.08±0.74
M5	5.03±0.58	5.40±0.64	5.04±0.54	5.18±0.66	4.73±0.97	5.26±0.66
T1	7.45±2.31 <sup>a</sup>	9.53±1.39	6.95±2.40 <sup>a</sup>	9.27±1.35	7.07±2.49 <sup>a</sup>	10.02±1.31
T2	2.25±1.37 <sup>a</sup>	3.60±0.69	2.23±1.45 <sup>a</sup>	3.60±0.68	1.78±1.02 <sup>a</sup>	3.24±0.78
T3~5	2.81±2.17 <sup>a</sup>	6.15±2.13	2.86±2.19 <sup>a</sup>	7.19±1.71	2.34±2.18 <sup>a</sup>	6.74±1.69

注：<sup>a</sup>实验组与对照组比较， $P<0.05$ 。

两组足底各区域接触时间百分比的对比结果见表 7。在 3 种步行状态下，患者 T2、T3~5 区域的接触时间百分比显著小于对照组，患者 HF、MF 区

域的接触时间百分比显著大于对照组，外翻斜面时患者患侧 M1 区域的接触时间百分比显著小于正常组。其余区域两组没有显著的差异。两组总接触

时间的对比分析表明,3种步行状态时患者总接触时间均显著大于对照组。内翻斜面时,患者和对照组总接触时间分别为(1 285.00±272.95)、(864.00±107.13) ms( $P<0.001$ );外翻斜面时,患者和对照组

总接触时间分别为(1 008.80±148.17)、(835.23±110.73) ms( $P=0.010$ );平地时,患者和对照组总接触时间分别为(981.00±141.45)、(791.14±111.05) ms( $P=0.003$ )。

表7 两组接触时间百分比对比

Tab.7 Comparison of contact time for each plantar region in two groups

单位: %

区域	平地		内翻斜面		外翻斜面	
	实验组	对照组	实验组	对照组	实验组	对照组
HF	71.06±7.18 <sup>a</sup>	55.73±7.60	75.96±11.90 <sup>a</sup>	60.21±6.34	75.87±9.80 <sup>a</sup>	57.82±8.98
MF	72.18±7.22 <sup>a</sup>	61.02±7.13	75.50±9.74 <sup>a</sup>	63.95±10.50	77.22±6.27 <sup>a</sup>	66.72±9.08
M1	79.97±9.04	80.66±5.81	88.78±5.04	86.91±4.79	73.42±18.78 <sup>a</sup>	82.07±5.51
M2	85.32±6.57	84.15±3.10	88.22±5.02	88.57±4.53	86.50±7.74	86.59±4.66
M3	86.76±6.68	85.25±2.64	88.91±4.69	89.19±3.98	90.62±5.04	88.11±4.07
M4	83.40±6.60	83.41±2.72	86.23±4.66	85.93±4.90	89.35±6.21	87.98±3.87
M5	76.60±6.32	75.48±3.57	76.69±8.86	76.65±8.68	81.99±7.10	83.41±4.77
T1	75.26±20.24	71.64±12.34	79.87±15.78	77.76±12.08	79.09±21.76	78.98±12.38
T2	43.78±20.71 <sup>a</sup>	64.29±13.20	53.19±32.38 <sup>a</sup>	72.02±11.93	38.61±18.77 <sup>a</sup>	54.84±17.58
T3~5	42.57±26.22 <sup>a</sup>	62.53±13.67	49.75±34.83 <sup>a</sup>	74.27±17.30	47.60±27.69 <sup>a</sup>	67.49±16.31

注: <sup>a</sup>实验组与对照组比较, $P<0.05$ 。

### 3 讨论

三踝骨折术后受试者患侧与健侧足底压力存在不对称性,主要表现为平地、内翻斜面、外翻斜面时患侧T3~5区域负重减少。在正常步态中,足跟触地和前足触地阶段发生前足旋前和胫骨内旋;全足支撑阶段和前足蹬离阶段发生前足旋后和胫骨外旋<sup>[13]</sup>。研究表明,大部分三踝骨折术后患者存在因踝关节疼痛、僵硬、肿胀而导致踝屈伸活动度显著减小的症状<sup>[2]</sup>。本研究中,患者患侧T3~5区域负重减少,可能是由于僵硬、疼痛等原因引起患者踝屈伸活动度减小,进而导致在前足蹬离阶段前足旋后的幅度减小,在足底压力测试中即表现为患侧T3~5区域峰值压强、接触面积、接触时间百分比减小。有研究也发现,左足扭伤患者第2~5趾峰值压力显著小于健康受试者,推测这可能与扭伤导致足底骨结构变化有关,也可能是由于机体保护性代偿使重心偏向正常脚所致<sup>[14]</sup>。研究显示,其他类型骨折(如Pilon骨折、跟骨骨折)术后足底压力也表现为双侧不对称,原因可能是关节发生纤维性粘连而引发踝关节功能障碍,也可能为胫骨下端载荷传导发生紊乱或长时间制动导致神经肌肉控制减弱等<sup>[15-16]</sup>。

与正常受试者对比,三踝骨折术后患者在步行

支撑期的步态存在异常,表现为前足蹬地时间、峰值压强和接触面积显著减小。研究发现,正常人平地自然步行时足跟触地、前足触地、全足支撑和前足蹬离分别占支撑相8.6%、9.2%、39%、43%<sup>[17]</sup>。黄红拾等<sup>[13]</sup>通过足底压力测试发现,骨科疾病如前交叉韧带损伤后患者支撑期各阶段比例较正常人有所改变。正常步行中,足底最大压力主要位于第2跖骨和跟骨,第1跖骨在步行的推进阶段发挥重要作用<sup>[18]</sup>。研究发现,腓骨长肌对于维持踝关节稳定性至关重要并且在蹬离阶段发挥重要作用,其起于腓骨外侧面,止于第1跖骨底和内侧楔骨,主要作用为外翻和跖屈踝关节<sup>[19-20]</sup>。胫后肌群主要活跃阶段在支撑后期,提供向前迈步的推动力以保证人体向前移动<sup>[20-21]</sup>。在足支撑期,前足与后足压力分布百分比与跟腱拉力呈线性关系,跟腱拉力增大,则前足压力也增大<sup>[22]</sup>。三踝骨折后,腓骨、胫骨的正常结构遭到破坏,可能会对腓骨长肌、胫后肌群的功能有所影响。因此,本文推测,三踝骨折术后患者步态异常可能与腓骨长肌、胫后肌群的肌肉力量减退有关。

三踝骨折术后患者在外翻斜面的整体运动控制能力、稳定性较正常者有所下降,但平地、内翻斜面的情况有待进一步探究。患者在外翻斜面的总接触时间显著大于正常者( $P=0.010$ ),说明患者比

正常者需要更多时间来调整身体力线和进行运动控制以维持平衡和稳定<sup>[23]</sup>;患者足底总接触面积显著小于正常者( $P=0.006$ ),也表明其整体稳定性下降<sup>[6]</sup>。患者在平地 and 内翻斜面的总接触时间显著大于正常者,但总接触面积无显著性差异,故尚不能明确其整体运动控制能力和稳定性的变化。研究显示,步行速度减慢也会使支撑相接触时间延长<sup>[24]</sup>。因此,后续可以对三踝骨折患者的步态进行探究,以进一步明确其在平地 and 内翻时稳定性和运动控制能力的变化。

外翻斜面的动态足底压力测试可以作为一种客观、有效评估踝功能的手段。患侧与健侧对比,在外翻斜面发现更多差异,如 HF、T3~5 的接触时间百分比;患者与正常者对比,外翻斜面也存在更多差异,例如总接触面积、M1 区域接触面积和接触时间百分比。因此,本文认为,外翻斜面的动态足底压力测试能够更灵敏地发现患侧与健侧、患者与正常者之间的足底压力差异。已有相关研究利用平地、内翻斜面、外翻斜面的生物力学测试(足底压力、表面肌电、运动捕捉等)对受试者的相关功能特征进行探究,研究对象包括健康受试者、慢性踝关节不稳患者、距下关节融合患者等<sup>[9-11]</sup>。

上述分析认为,患侧与健侧 T3~5 区域的差异可能是由于踝屈伸活动度减小导致;患者与正常人相比,前足蹬地力量不足,可能与腓骨长肌、胫后肌群的肌肉力量减退有关;患者在外翻斜面时,整体运动控制能力、稳定性较正常者有所下降。因此,患者可以着重下述功能的康复:改善踝关节屈伸活动度;增强腓骨长肌、胫后肌群的肌肉功能,以增强步行时蹬地的力量;提高在外翻斜面的稳定性和平衡能力。本文结果表明,患者在外翻时处于不稳定的状态。而研究发现,在不稳定状态进行稳定性训练有助于增强相关肌肉如腓骨长肌和本体感受器的功能。因此,对患者进行辅助下的外翻行走训练,可能有利于其踝关节的康复<sup>[8,25-26]</sup>。

## 4 结论

三踝骨折术后患者患侧和健侧足底压力特征存在不对称性。与正常者对比,患者在步行支撑相后足着地力量尚可,前足蹬地力量不足。患者在外翻斜面运动控制能力、稳定性较正常者有所下降。

外翻斜面的足底压力测试能够作为患者踝功能的客观、有效评估方法。

## 参考文献:

- [1] 丁永利,宋跃明. 腓骨在踝关节稳定性中的作用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2002, 16(4): 245-247.
- [2] SANDER VH, MICHAEL H, VERBRUGGEN JPAM, et al. Gait analysis related to functional outcome in patients operated for ankle fractures [J]. J Orthop Res, 2018, 37(7): 1658-1666.
- [3] HIRSCHM ÜLLER A, KONSTANTINIDIS L, BAUR H, et al. Do changes in dynamic plantar pressure distribution, strength capacity and postural control after intra-articular calcaneal fracture correlate with clinical and radiological outcome? [J]. Injury, 2011, 42(10): 1135-1143.
- [4] MEHLHORN AT, WALTHER M, YILMAZ T, et al. Dynamic plantar pressure distribution, strength capacity and postural control after Lisfranc fracture-dislocation [J]. Gait Posture, 2017, 52: 332-337.
- [5] HU X, JUN Z, DONGSHENG P, et al. Estimation of foot plantar center of pressure trajectories with low-cost instrumented insoles using an individual-specific nonlinear model [J]. Sensors, 2018, 18(2): 421-437.
- [6] NIU W, CHU Z, YAO J, et al. Effects of laterality, ankle inversion and stabilizers on the plantar pressure distribution during unipedal standing [J]. J Mech Med Biol, 2012, 12(3): 1-15.
- [7] DENYER JR, HEWITT NLA, MITCHELL ACS. Foot structure and muscle reaction time to a simulated ankle sprain [J]. J Athl Train, 2013, 48(3): 326-330.
- [8] 元文学,孟昭莉,李敏炯. 步行平衡控制研究的现状及发展[J]. 武汉体育学院学报, 2001, 35(2): 101-103.
- [9] NIU WX, YAO J, CHU ZW, et al. Effects of ankle eversion, limb laterality, and ankle stabilizers on transient postural stability during unipedal standing [J]. J Med Biol Eng, 2015, 35(1): 69-75.
- [10] 杨崇林. 距下关节融合术后足踝形态功能改变的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [11] WEATHERALL JM, MROCZEK K, MCLAURIN T, et al. Post-traumatic ankle arthritis [J]. Bull Hosp Jt Dis, 2013, 71(1): 104-112.
- [12] 朱婷,马霞,翟华,等. 踝关节不同应力位的动态足底压力特征[J]. 医用生物力学, 2020, 35(4): 342-348. ZHU T, MA X, ZHAI H, et al. Dynamic plantar pressure features of ankle joints at different stress positions [J]. J Med Biomech, 2020, 35(4): 342-348.
- [13] 黄红拾,于媛媛,郭秦炜,等. 前交叉韧带断裂患者步行时足底压力时间特征[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(3):

- 271-274.
- [14] 冯志钢. 踝关节损伤对高校男大学生足底压力特征的影响[J]. 体育世界(学术版), 2015(2): 140-140.
- [15] JANSEN H, FENWICK A, DOHT S, *et al.* Clinical outcome and changes in gait pattern after pilon fractures [J]. *Int Orthop*, 2013, 37 (1): 51-58.
- [16] HOEVE S, DE VOS J, VERBRUGGEN JP, *et al.* Gait analysis and functional outcome after calcaneal fracture [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2015, 14(22): 1879-1888.
- [17] 黄红拾, 敖英芳, 李松竹, 等. 健康女大学生步行时左右足支撑期时相特征比较[J]. 中国运动医学杂志, 2011, 30(2): 136-139.
- [18] 樊霄燕, 周军杰, 曹成福, 等. 基于 F-Scan 三维动态足底压力分析系统的动静态足底压力分析[J]. 中国组织工程研究, 2011, 15(50): 9406-9409.
- [19] 刘颖, 周思远, 郑拥军, 等. 基于有限元分析腓肠肌作用力对足部生物力学的影响[J]. 医用生物力学, 2016, 31(5): 437-442.
- LIU Y, ZHOU SY, ZHENG YJ, *et al.* Effects of gastrocnemius muscle force on foot biomechanics based on the finite element analysis [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(5): 437-442.
- [20] 黄萍, 齐进, 邓廉夫, 等. 正常青年人自然步态下肢肌的表  
面肌电图分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(20): 3680-3684.
- [21] PANICHAWIT C, BOVONSUNTHONCHAI S, VACHALATHITI R, *et al.* Effects of foot muscles training on plantar pressure distribution during gait, foot muscle strength, and foot function in persons with flexible flatfoot [J]. *J Med Assoc Thai*, 2015, 98(Suppl 5): S12-17.
- [22] 张伟, 荀福兴, 谭为, 等. 足支撑时相跟腱不同拉力负荷时足底压力的分布[J]. 医用生物力学, 2012, 27(3): 329-332.
- ZHANG W, XUN FX, TAN W, *et al.* Plantar pressure distributions during support phase under different Achilles tensile loads [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(3): 329-332.
- [23] 王海军, 杨洪涛. 25~27岁肥胖男青年自然行走时足底压力分析[J]. 河北科技师范学院学报, 2014, 28(4): 82-87.
- [24] 于小勇, 董必强, 刘光宙, 等. 不同步速下足迹样本特征变化研究[J]. 江苏警官学院学报, 2011, 26(5): 174-178.
- [25] BAVDEK R, ZDOLŠEK A, STROJNIK V, *et al.* Peroneal muscle activity during different types of walking [J]. *J Foot Ankle Res*, 2018, 11(1): 50-59.
- [26] MEZZARANE RA, KOHN AF. Control of upright stance over inclined surfaces [J]. *Exp Brain Res*, 2007, 180(2): 377-388.