

文章编号: 1004-7220(2022)04-0748-06

髌股关节疼痛患者足底压力评估模型构建

周文琪¹, 袁正¹, 冉静², 许杰², 洪桥梅¹, 罗小兵¹, 沈海¹, 王婧鲜¹

(1. 四川省骨科医院 运动医学科, 成都 610041; 2. 成都体育学院 运动与健康学院, 成都 610041)

摘要:目的 构建髌股关节疼痛(patellofemoral pain, PFP)足底压力模型,为该病康复评定提供理论依据。方法 采用病例对照研究,共纳入126例PFP患者(PFP组),并根据年龄、性别1:1匹配126例健康志愿者纳入对照组。以是否发生PFP为因变量,以受试者自选步速下平地行走时足底12个分区峰值压力和峰值压强为自变量,分别构建峰值压力、峰值压强与PFP的条件logistic回归方程,并绘制对应方程的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,计算曲线下面积以分析不同方程对PFP的评估效果。结果 构建受试者足底12个分区峰值压力与PFP的条件logistic回归方程,仅足跟外侧区峰值压力进入回归方程;而通过各个分区峰值压强构建的回归方程中则包括足跟内侧区、中足区、第1跖骨区、第2跖骨区4个区域的变量,同时压强方程ROC曲线下面积大于压力方程曲线下面积。结论 可使用平地行走中PFP患者足底不同分区峰值压力、压强对PFP进行评估,峰值压强评估效果相对较好。

关键词: 髌股关节疼痛; 足底压力; 足底压强; 条件logistic回归; 受试者工作特征曲线

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.026

Development of Plantar Force Assessment Model for Patients with Patellofemoral Pain

ZHOU Wenqi¹, YUAN Zheng¹, RAN Jing², XU Jie², HONG Qiaomei¹, LUO Xiaobing¹, SHEN Hai¹, WANG Jingping¹

(1. Department of Sport Medicine, Sichuan Orthopedic Hospital, Chengdu 610041, China; 2. College of Sports and Health, Chengdu Sports University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Objective To develop plantar force model of patellofemoral pain (PFP), so as to provide theoretical references for the assessment of PFP rehabilitation. **Methods** The case-control study was conducted, and a total of 126 patients with PFP and 126 healthy controls matched by gender and age were enrolled in the study. The participants were tested for plantar force and pressure during level walking, and twelve plantar regions were divided and recorded. Whether the participants suffered PFP was analyzed as dependent variable, meanwhile the peak force and peak pressure in 12 plantar regions of participants at selected speed during level walking were analyzed as independent variables. Conditional logistic regression (CLR) equations of peak force and peak pressure with PFP were established, respectively. The receiver-operating characteristic (ROC) curve of the corresponding equations was derived, and the area under ROC curve was calculated to analyzed the validity of different equations on PFP assessment. **Results** The CLC equation of peak force in 12 plantar regions of the participants with FFP was constructed, and only peak force of lateral heel was in the equation. The CLC equation of peak pressure in each plantar region included medial heel, midfoot, 1st and 2nd metatarsals. Meanwhile, the

收稿日期:2021-08-16; 修回日期:2021-10-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFF0301703),四川省干部保健科科研课题(川干研2021-602),成都中医药大学医院项目(YYZX2018007)

通信作者:沈海,主任医师,Email:2430967067@qq.com

area under ROC curve of the pressure equation was larger than that of the force equation. **Conclusions** Peak force and pressure at different plantar regions can be used to assess PFP during level walking, and peak pressure is more effective for assessment.

Key words: patellofemoral pain (PFP); plantar force; plantar pressure; conditional logistic regression; receiver-operating characteristic (ROC) curve

髌股关节疼痛(patellofemoral pain, PFP)是一种常见的运动系统过度使用性损伤,患者多在走、跑、跳、蹲、上下楼梯等下肢负重运动中出现髌周区域疼痛。PFP在运动人群中相对常见,患病率约为25%,被认为与患者下肢运动功能紊乱有关,如股四头肌和髌外展肌力量下降、下蹲及跳跃等动作中膝关节额状面投影角增大等^[1-5]。对上述特征进行干预治疗,被证实可缓解疼痛等临床症状,恢复患者运动功能。

研究发现,PFP患者静态站立时足部呈旋前姿势^[5]。为探索患者在动态动作中足部是否亦存在功能异常,本文以足底压力测试为手段,对PFP患者足底动力学特征进行总结。足底压力测试技术已被应用于糖尿病足、矫形足、跟骨骨折等疾病的诊断、康复评估工作中^[6]。因此,使用该技术对PFP患者足底动力学特征进行分析总结,可促进PFP评估工作的进一步展开,对临床方案的制定有较大意义。

近年来有关使用足底压力技术对PFP患者进行测试的研究已有报道,但结果尚未达成一致。Thijs等^[7]的前瞻性队列研究发现,受试者行走时后足外侧峰值压强升高是PFP的风险因素。Aliberti等^[8]的回顾性研究排除了任何可能影响正常步态的情况(但未详细描述具体情况),发现相比健康对照组,PFP患者前足内侧峰值压强较低。而Dag等^[9]的横断面研究则将足旋前、足旋后、平足症、马蹄足等情况均列为排除标准,发现PFP组和对照组的足底各分区峰值压力或压强无明显区别。本文推测,以上结果不一致的原因是受试者纳入排除标准不同所造成。而由于无症状的静态足旋前已被证实是PFP的临床表现之一,故为总结PFP患者足底动力学特征,排除严重足部畸形、足踝部急性损伤等可能影响患者正常行走的情况外,无症状足旋前或旋后等不应作为研究的排除标准。在此基础上,本文对PFP患者平地行走时足底不同分区压力、压强分布情况进行分析,并构建PFP患者足底

动力学评估模型,以确定适宜的评价指标,作为该病康复评定的重要依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

使用PASS样本量计算软件中“匹配的病例对照样本量计算公式”计算最小样本量。根据已有研究,PFP在人群中的患病率为0.25,由静态足旋前的OR约为3,规定 $\alpha=0.05$, $\beta=0.10$,两组匹配样本量之比为1:1,病例与第1个匹配的对照之间危险因素相关程度为0.2^[1]。将上述变量代入公式,计算出每组最小样本量为75例。

2019年6月~2020年6月,于四川省骨科医院运动医学科门诊收集PFP受试者,符合纳入排除标准的PFP患者共126例,将其连续纳入本项研究(PFP组),包括99例单膝受累患者及27例双侧受累患者(合计患肢153例)。在四川省骨科医院职工、社区居民、患者家属中招募志愿者,按照性别、年龄(± 3 岁)1:1匹配的方式纳入126例志愿者,作为健康对照组。

PFP组纳入标准参考《美国物理治疗师协会2019年髌股关节疼痛临床指南》^[1]:①年龄18~45岁;②单侧或双侧膝关节疼痛;③走路、跑步、上楼、下楼、下蹲、跳跃、屈膝久坐7个动作中至少发生两个出现膝关节疼痛;④疼痛持续两周及以上;⑤疼痛视觉模拟量表(visual analog scale, VAS)评分3~10分(0分代表无痛,10分代表最大疼痛);⑥首次发病、首次因该病就诊;⑥签署知情同意书。对照组纳入标准:①年龄18~45岁;②无现患运动系统疾病,无PFP病史,且入组前12周无运动系统病史;③纳入匹配对象的同侧肢体数据,即患者为左侧受累,则选择对照组左侧纳入研究,若为右侧,则纳入对照组右侧数据,若患者为双侧受累,则纳入对照组双侧数据,每名对照组成员仅匹配一次数据;④签署知情同意书。

排除标准:① 膝关节韧带(含交叉韧带、侧副韧带)、半月板、髌胫束、鹅足腱、髌腱损伤;② 膝关节结核、膝骨关节炎;③ 痛风(含高尿酸血症)、风湿病、椎间盘源性疾病;④ 踝关节扭伤急性期和严重足踝部畸形,如马蹄足、重度拇外翻等(含上述足部畸形矫正术后);⑤ 入组前12周末接受下肢康复治疗;⑥ 专业运动员(包括市级、省级、国家级集训队和运动队的现役及退役运动员)。

所有受试者入组均通过3名经统一培训后对本研究目的、方法具备相同认识的具有中级及以上技术职称的骨科、运动医学科医师确定。本研究经四川省骨科医院伦理委员会批准。

1.2 数据采集及处理

使用美国 Tekscan 足底压力测试系统对受试者平地步行足底压力进行测试,采集足底各分区压力和压强。测力板长 1.58 m、宽 0.8 m、厚 5 mm,含 17 698 个电阻传感器,1.4 个传感器/cm²,采样频率为 40 Hz。受试者在长为 15 m 的步道上行走,测力板放置于步道中央位置,以保证受试者在测试中接触测力板前、经过测力板后均有至少 3 个完整步态周期,且测力板上双足各收集至少两个完整足印,以避免运动初始加速和终末减速对足底压力参数的影响^[6]。

每次测试前将受试者体重、双侧股骨大转子至外踝长度录入系统进行校准,校准完成后嘱受试者赤足、保持安静、双目平视前方,按照自选步速匀速往返行走于步道上,待其熟悉测试环境并完成至少 3 次往返行走后,从第 4 次往返开始正式采集数据,最终采集 3 次有代表性和可靠性的数据。符合要求的测试需满足以下条件:① 双足各收集至少两个完整足印;② 受试者匀速行走于步道上;③ 所收集的数据无噪点。

通过系统自带的 WalkwayTM 足底压力分析系统对数据进行处理,将足底分为 12 个分区,分别为第 1 趾区(T1)、第 2 趾区(T2)、第 3 趾区(T3)、第 4~5 趾区(T45)、第 1 跖骨区(M1)、第 2 跖骨区(M2)、第 3 跖骨区(M3)、第 4 跖骨区(M4)、第 5 跖骨区(M5)、中足区(MF)、足跟内侧区(MH)、足跟外侧区(LH)。分别采集各分区的峰值压力(peak force)和峰值压强(peak pressure),取各分区 3 次测试数据的平均值进行进一步统计分析^[12]。

1.3 数据统计分析

采用 SPSS 21.0 统计学软件包进行数据分析。采用 Shapiro-Wilk 检验进行正态分布检验,对符合正态分布的计量资料采用均数±标准差表示,组间单因素分析采用独立样本 *t* 检验,不符合正态分布的计量资料采用中位数和 4 分位数间距[*M*(P25~P75)]表示,组间单因素分析采用 Mann-Whitney *U* 检验。使用条件 logistic 回归构建 PFP 与足底不同分区负荷的回归模型,为避免多种变量存在多重线性相关,将峰值压力、峰值压强分开构建回归方程,即以是否发生 PFP 为因变量,以峰值压力为自变量建立方程 1,以峰值压强为自变量建立方程 2。为避免位于不同足底分区的同种类变量(如 12 个分区的峰值压力)之间存在共线性问题,在进行回归分析前分别对不同分区峰值压力、峰值压强进行多重线性诊断,容忍度(tolerance)>0.2 或方差膨胀因子(VIF)<10 的变量将被判断为不存在共线性,可进行条件 logistic 回归,自变量采用极大似然估计的逐步向后回归法进入模型, $\alpha=0.05$ 。同时,使用压力、压强方程分别计算受试者 PFP 发病预测值,以该值为检验变量,以实际是否发病为状态变量,分别绘制峰值压力和峰值压强两条受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线。该曲线以敏感度为纵坐标,以(1-特异度)为横坐标,曲线与横纵坐标围成的面积为曲线下面积(area under the curve, AUC)。通过 AUC 分析使用峰值压力、峰值压强指标对 PFP 的评估效果。

2 结果

126 例 PFP 组患者完成测试,男、女比为 83:43,年龄(24.49±6.13)岁。同时,根据性别、年龄(±3岁)1:1 匹配健康对照组。两组身高、体重、年龄指标符合正态分布(Shapiro-Wilk 检验, $P>0.05$),指标差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。

表 1 受试者一般资料

Tab. 1 General data of the participants

参数	PFP 组	对照组	<i>t</i>	<i>P</i>
男:女	83:43	83:43		
年龄/岁	24.49±6.13	24.80±6.15	0.258	0.797
身高/cm	171.00±8.34	171.45±8.72	0.267	0.790
体重/kg	64.42±11.34	63.10±9.68	0.634	0.528

两组各足底分区峰值压力、峰值压强均不符合正态分布(Shapiro-Wilk 检验, $P < 0.05$), 经 U 检验, 上述指标组间差异无统计学意义($P > 0.05$), 见表 2。

通过共线性诊断, LH 峰值压强与其他变量存在共线性(容忍度 = 0.164, $VIF = 6.110$), 故不将该变量纳入回归方程。其余变量均无共线性(容忍

度 > 0.2 且 $VIF < 10$), 均进入条件 logistic 回归。

针对足底各分区峰值压力和峰值压强分别进行条件 logistic 回归。结果发现, 相比健康对照组, PFP 组 LH 区域峰值压力升高($P < 0.05$); 同时, LH、MF 和 M1 峰值压强升高、M2 峰值压强下降($P < 0.05$), 见表 3。

表 2 两组足底各分区单因素分析结果

Tab. 2 Univariate analyses of peak force and peak pressure for the control and the PFP

分区	峰值/N				压强峰值/(N·cm ⁻²)					
	PFP 组		对照组	Z	P	PFP 组		对照组	Z	P
LH	138.08(103.08, 191.20)		154.25(99.76, 242.84)	0.883	0.377	12.17(8.39, 15.87)		11.07(7.54, 18.65)	0.171	0.864
MH	113.08(90.36, 168.27)		99.76(67.52, 179.73)	0.756	0.449	10.77(8.08, 14.36)		8.33(6.64, 16.92)	0.860	0.390
MF	64.58(23.91, 102.80)		35.67(22.15, 72.72)	1.429	0.153	3.72(2.64, 5.52)		3.44(2.08, 5.51)	0.472	0.576
M1	83.01(42.83, 134.06)		86.93(47.82, 138.77)	0.201	0.841	8.77(4.89, 12.34)		9.68(5.56, 13.81)	0.559	0.576
M2	94.08(67.52, 129.95)		108.68(67.52, 144.45)	0.746	0.456	14.08(9.41, 18.07)		15.46(9.93, 24.29)	1.322	0.186
M3	99.57(64.97, 140.04)		97.31(66.44, 150.53)	0.238	0.812	11.81(9.03, 16.63)		14.96(8.57, 22.13)	1.322	0.186
M4	62.03(42.14, 95.65)		59.88(38.42, 101.92)	0.114	0.909	7.66(5.57, 11.41)		8.93(6.14, 14.66)	1.590	0.112
M5	34.50(13.52, 49.88)		32.54(14.80, 50.86)	0.351	0.725	5.47(3.39, 10.22)		6.47(4.01, 10.63)	0.569	0.569
T1	60.86(26.26, 98.49)		41.06(12.35, 85.06)	1.509	0.131	8.87(4.58, 13.60)		6.89(4.69, 14.62)	0.820	0.412
T2	9.31(4.61, 19.50)		7.94(2.55, 15.29)	1.419	0.156	5.55(2.92, 8.72)		4.54(2.36, 7.55)	1.245	0.213
T3	2.65(1.27, 6.86)		2.94(0.88, 6.76)	0.275	0.784	3.19(1.88, 5.59)		3.71(1.82, 5.75)	0.717	0.474
T45	0.002(0.000, 1.08)		0.10(0, 0.88)	0.499	0.617	0.004(0, 2.28)		0.75(0, 3.41)	0.711	0.477

注: LH 为足跟外侧; MH 为足跟内侧; MF 为中足; M1 为第 1 跖骨区; M2 为第 2 跖骨区; M3 为第 3 跖骨区; M4 为第 4 跖骨区; M5 为第 5 跖骨区; T1 为第 1 趾区; T2 为第 2 趾区; T3 为第 3 趾区; T45 为第 4~5 趾区。

表 3 条件 logistic 回归结果

Tab. 3 Results of multivariate analyses of conditional logistic regression

参数	峰值压力			峰值压强			
	LH	MH	M2	MH	MF	M1	M2
回归系数	-0.017	0.009	-0.073	0.220	0.022	0.747	-0.246
P	0.004	0.075	0.146	0.014	0.005	0.003	0.001
OR	0.983	1.009	0.929	1.247	1.023	2.110	0.782
95% 置信区间	0.972~0.995	0.999~1.020	0.842~1.026	1.046~1.486	1.007~1.039	1.294~3.439	0.675~0.906

根据条件 logistic 回归结果, 构建两个回归方程, 分别为足底各分区峰值压力与 PFP 的方程 1, 以及各分区峰值压强与 PFP 关系的回归方程 2。如表 4 所示, 峰值压力方程 ROC 曲线下面积为 0.833, 峰值压强方程曲线下面积为 0.928, 两者曲线下面积差异亦可见图 1。

3 讨论

PFP 是临床常见病、多发病, 患者主诉膝关节疼痛且与运动量、运动强度密切相关, 但临床病理学、影像学等检查显示患者无生化及解剖结构异常, 故 PFP 被认为是下肢运动功能紊乱、生物力学

表 4 峰值压力、压强 ROC 曲线下面积比较

Tab. 4 Comparison of area under the ROC curve between the variables of peak force and peak pressure

参数	峰值压力	峰值压强
临界值	0.93	0.79
敏感性	0.627	0.824
特异性	1.00	0.94
约登指数	0.627	0.760
P	<0.001	<0.001
AUC	0.833	0.928
(95% 置信区间)	(0.751~0.916)	(0.875~0.982)

异常导致的功能性临床综合征。因此, 相关评估工作需围绕下肢运动功能评估展开。本文针对 PFP

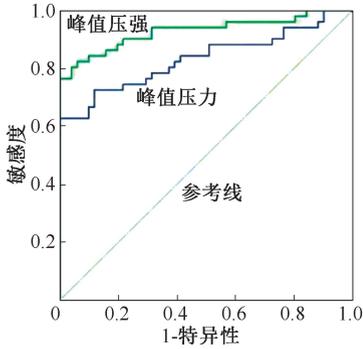


图1 各足底各分区峰值压力、压强 ROC 曲线

Fig. 1 ROC curves of probability value calculated by logistic model of peak force and peak pressure of each plantar region

患者可能存在足踝部功能异常的情况,使用足底压力测试技术,总结 PFP 患者行走过程中足底动力学特征,为该病评估工作提供相关依据。

通过非参数检验,本文发现,PFP 患者在平地行走时足底各区域峰值压力、峰值压强与健康对照之间无明显差异,该结果与 Dag 等^[9]和 Luza 等^[10]的研究结果相似。但随后通过条件 logistic 回归发现,前、中、后足各有不同指标发生变化,并可对 PFP 进行评价,其可能原因在于足底压力对 PFP 的影响并非仅源于足底某个单一区域,而是若干区域压力负荷变化的共同影响。因此,本文选择多因素回归进行进一步分析。

根据 logistic 分析结果,不同足底分区的峰值压力和峰值压强均可形成用于评估 PFP 的回归方程。其中,压力方程中仅有 LH 峰值压力这一变量 ($P < 0.05$),而压强方程包含了 MH、MF、M1 和 M2 共计 4 个区域 ($P < 0.05$),且后者对 PFP 的评价效果优于前者,这可能是由于 PFP 患者行走过程中足底各分区与地面的接触面积发生变化^[7,11]。因此,压强作为可兼顾压力和面积两方面因素的指标,对 PFP 的评估效力相对单纯的压力指标更高。PFP 患者 MH 峰值压强升高、LH 峰值压力明显下降,表明 PFP 患者在足跟着地期后足压力分布出现向内侧偏移的趋势,提示该时相后足可能相对外翻,这与 PFP 患者的运动学和动力学研究结果相似,即在这一时相后足呈现出外翻力矩、活动度上升的趋势,而这一趋势又与股骨内收、胫骨内旋力矩、活动度正相关^[12-13]。虽然目前尚无法证实两者的因果

关系,但上述股骨、胫骨、后足动态力线的变化均可能导致髌股关节负荷发生改变,是患者出现临床症状的重要原因之一^[14]。随后进入足平期主要为中足与地面相接触,PFP 患者 MF 峰值压强升高,这可能与患者纵弓高度降低相关。Andrew 等^[15]比较了平足症患者与足弓正常受试者在平地行走时的足底压强,发现平足症患者 MF 区域峰值压强升高。研究表明,前足的峰值压强主要出现在蹬地期,健康受试者前足峰值压力、压强多出现在第 2、3 跖骨区,这是由于此处具备较高稳定性的解剖结构,保证了由足平期向蹬地期过渡时前足可获得充足的动能和势能^[14,16];而本文发现,PFP 患者在 M2 压强下降,M1 压强升高,提示 PFP 患者 M2 可能存在由各种原因导致的稳定性降低,使得本该集中于这一区域的力被分散于前足其他区域,故 PFP 患者 M1 峰值压强升高。但该假设还需进一步研究加以证实。

基于上述特征,在对应康复治疗策略的选择上,可进行以调整足底压力分布为目标的干预措施,并观察其临床疗效。研究发现,足弓垫、步态再训练等针对 PFP 患者足踝部的干预治疗可缓解其临床症状^[17-19]。尽管目前尚无高质量随机对照试验证实上述干预是否与改善 PFP 患者足底压力分布有关,但已有研究发现,通过相同或相似的干预手段,可使平足症、慢性踝关节不稳等患者的足底动力学特征发生改变。例如:足弓垫、步态再训练可使中足峰值压力、压强下降^[20-21],足踝部肌肉抗阻训练则可使跑步时足跟外侧峰值压力上升^[22]。因此,可开展进一步研究,探讨足踝部干预治疗对改善 PFP 患者足底压力的有效性,以及上述改变与临床症状缓解之间的关系。

4 结论

PFP 患者在平地行走中前、中、后足压力、压强分布均发生一定变化,包括后足外侧压力降低、内侧压强升高、中足压强升高等,其中压强类指标的改变更为明显。在后续研究中,需进一步探索可采取的康复手段与足底压力分布改善之间的关系,以期确定不同足底动力学变化所对应的康复方式,提升干预治疗的针对性。

参考文献:

- [1] WILLY RW, HOGLUND LT, BARTON CJ, *et al.* Patellofemoral pain [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2019, 49(9): CPG1-CPG95.
- [2] 杨辰, 曲峰, 刘卉, 等. 髌股关节痛业余跑者性别特异的下肢生物力学特征[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(6): 672-678.
YANG C, QU F, LIU H, *et al.* Sex-specific lower extremity biomechanics of amateur runners with patellofemoral pain [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(6): 672-678.
- [3] NEAL BS, LACK SD, LANKHORST NE, *et al.* Risk factors for patellofemoral pain: A systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 2019, 53(5): 270-281.
- [4] NUNES GS, OLIVEIRA SILVA D, PIZZARI T, *et al.* Clinically measured hip muscle capacity deficits in people with patellofemoral pain [J]. *Phys Ther Sport*, 2019, 35(3): 69-74.
- [5] SELFE J, JANSSEN J, CALLAGHAN M, *et al.* Are there three main subgroups within the patellofemoral population? A detailed characterisation study of 127 patients to help develop targeted intervention (TIPPS) [J], *Br J Sports Med*, 2016, 50(14): 873-880.
- [6] 马新颖, 满喜. 不同年龄段人群行走足底压力特征分析[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 108-113.
MA XY, MAN X. Analysis on characteristics of plantar pressures in different age groups during walking [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 108-113.
- [7] THIJS Y, TIGGELEN D, ROOSEN P, *et al.* A prospective study on gait-related intrinsic risk factors for patellofemoral pain [J]. *Clin J Sport Med*, 2007, 17(6): 437-445.
- [8] ALIBERTI S, COSTA M, CAMPOS PASSARO A, *et al.* Influence of patellofemoral pain syndrome on plantar pressure in the foot rollover process during gait [J]. *Clinics*, 2011, 66(3): 367-372.
- [9] DAG F, DAL U, ALTINKAYA Z, *et al.* Alterations in energy consumption and plantar pressure distribution during walking in young adults with patellofemoral pain syndrome [J]. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 2019, 53(1): 50-55.
- [10] LUZA LP, LUZA M, SANTOS GM. Patellofemoral pain syndrome modifies the movement of the rearfoot, but it does not alter plantar pressure distribution [J]. *Rev Bras Ortop*, 2020, 55(4): 419-425.
- [11] WILLSON JD, ELLIS ED, KERNOZEK TW. Plantar loading characteristics during walking in females with and without patellofemoral pain [J]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2015, 105(1): 1-7.
- [12] CEYSSENS L, VANELDEREN R, BARTON C, *et al.* Biomechanical risk factors associated with running-related injuries: A systematic review [J]. *Sports Med*, 2019, 49(7): 1095-1115.
- [13] LUZ BC, DOS SANTOS AF, DE SOUZA MC, *et al.* Relationship between rearfoot, tibia and femur kinematics in runners with and without patellofemoral pain [J]. *Gait Posture*, 2018, 61(2): 416-422.
- [14] A DE VRIES B, A VAN DER HEIJDEN R, POOT DJ, *et al.* Quantitative DCE-MRI demonstrates increased blood perfusion in Hoffa's fat pad signal abnormalities in knee osteoarthritis, but not in patellofemoral pain [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(6): 3401-3408.
- [15] BULDT AK, ALLAN JJ, LANDORF KB, *et al.* The relationship between foot posture and plantar pressure during walking in adults: A systematic review [J]. *Gait Posture*, 2018, 62: 56-67.
- [16] NEUMANN DA. Kinesiology of the musculoskeletal system foundations for rehabilitation [M]. 2nd ed. Singapore: Elsevier, 2014: 608.
- [17] SINCLAIR J, JANSSEN J, RICHARDS JD, *et al.* Effects of a 4-week intervention using semi-custom insoles on perceived pain and patellofemoral loading in targeted subgroups of recreational runners with patellofemoral pain [J]. *Phys Ther Sport*, 2018, 34(4): 21-27.
- [18] YOSMAO? LU HB, SELFE J, SONMEZER E, *et al.* Targeted treatment protocol in patellofemoral pain: Does treatment designed according to subgroups improve clinical outcomes in patients unresponsive to multimodal treatment? [J] *Sports Health*, 2020, 12(2): 170-180.
- [19] BONACCI J, HALL M, SAUNDERS N, *et al.* Gait retraining versus foot orthoses for patellofemoral pain: A pilot randomised clinical trial [J]. *J Sci Med Sport*, 2018, 21(5): 457-461.
- [20] DICKERSON LC, QUEEN RM. Foot posture and plantar loading with ankle bracing [J]. *J Athl Train*, 2021, 56(5): 461-472.
- [21] FEGER MA, HERTEL J. Surface electromyography and plantar pressure changes with novel gait training device in participants with chronic ankle instability [J]. *Clin Biomech*, 2016, 37(8): 117-124.
- [22] FOURCHET F, KUITUNEN S, GIRARD O, *et al.* Effects of combined foot/ankle electromyostimulation and resistance training on the in-shoe plantar pressure patterns during sprint in young athletes [J]. *J Sports Sci Med*, 2011, 10(2): 292-300.