

文章编号:1004-7220(2020)03-0338-09

中央型腰椎管狭窄症患者间歇性跛行症状出现前后的足底压力分析

魏伟, 张扬, 徐超, 杨晓江, 卢昌波, 雷伟

(空军军医大学附属西京医院 骨科, 西安 710032)

摘要:目的 研究中央型腰椎管狭窄症(lumbar spinal stenosis, LSS)患者出现间歇性跛行(neurogenic intermittent claudication, NIC)症状前后的足底压力变化情况及跌倒风险,为足底压力分析应用于LSS患者行走功能判定提供理论与数据参考。**方法** 选取12名患有腰L4~5节段中央型LSS患者作为实验组,同时以12名同年龄健康成人作为对照组,采用Footscan®足底压力测试系统进行动态足底压力测试,通过比较实验组运动前后与对照组运动前后站立相时间(contact time, CT)及各分期时间百分比(CT%)、步向角(foot progression angle, FPA)、足底各分区接触面积百分比(CA%)和压强时间积分(pressure-time integral, PTI),评估行走状态下患者足底压力的变化情况。**结果** 实验组症状出现前与对照组相比,足跟触地期(initial contact phase, ICP)CT%减小,前足离地期(foot push-off phase, FFPOP)CT%增高,总接触时间、FPA、第1~3跖骨头区PTI以及第2、第3跖骨头区CA%增加;实验组运动至NIC症状出现后,其全足触地期(foot flat phase, FFP)与前足离地期CT%、总接触时间、FPA、第1~4跖骨头区PTI和CA%、足趾区CA%增加,足跟触地期与前足触地期(foot contact phase, FFCP)CT%、足跟区PTI和CA%均减小。**结论** 中央型LSS患者在行走时足底压力分布向前足转移,站立相时间周期出现异常。这些异常可因NIC症状出现而进一步加重,患者具有更高的跌倒风险。

关键词:腰椎管狭窄症;间歇性跛行;足底压力;步态分析;生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.03.012

Analysis of Plantar Pressure before and after Occurrence of Neurogenic Intermittent Claudication in Patients with Central Lumbar Spinal Stenosis

WEI Wei, ZHANG Yang, XU Chao, YANG Xiaojiang, LU Changbo, LEI Wei

(Department of Orthopedics, Xijing Hospital, the Air Force Medical University of PLA, Xi'an 710032, China)

Abstract: Objective To investigate the changes of plantar pressure distributions and risk of falling before and after the occurrence of neurogenic intermittent claudication (NIC) in patients with central lumbar spinal stenosis (LSS), so as to provide theoretical and data references for the application of plantar pressure analysis in judgment of walking abilities for LSS patients. **Methods** Twelve patients with LSS at the L4-5 segment were selected as the LSS group, while twelve healthy adults at the same age were selected as the control group. Footscan® system was used to measure plantar pressure of these subjects during walking. Contact area percentage of the total foot contact area (CA%), pressure-time integral (PTI), foot progression angle (FPA), contact time

收稿日期:2019-04-15; 修回日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(81672132)

通信作者:雷伟,教授,主任医师, E-mail: leiwei@fmmu.edu.cn

percentage of the stance time (CT%) and total stance time (CT) in both LSS group and control group were compared to evaluate changes of plantar pressures during walking. **Results** Before the occurrence of NIC, compared with the control group, the LSS group had lower CT% during the forefoot push-off phase (FFPOP) and higher CT% during the initial contact phase (ICP), the total CT and FPA also increased, and the PTI of the 1st-3rd metatarsals and the CA% of the 2nd and 3rd metatarsals were higher. After the NIC occurred, for LSS group, CT% during ICP and forefoot contact phase (FFCP) decreased, CT% during the foot flat phase (FFP) and FFPOP as well as total CT and FPA increased, the PTI and CA% increased in 1st-4th metatarsals. Moreover, the CA% also increased in toe zone, both the PTI and CA% decreased in heel zone. **Conclusions** In patients with central LSS during walking, the distribution of plantar pressure shifts forward, with abnormal phase of the stance time occurring. Such abnormality will be further aggravated by NIC, indicating a higher risk of falling.

Key words: lumbar spinal stenosis (LSS); neurogenic intermittent claudication (NIC); plantar pressure; gait analysis; biomechanics

腰椎管狭窄症(lumbar spinal stenosis, LSS)是指各种病因引起的椎管管径缩短以致椎管内神经、血管组织等逐渐受压,从而导致相应神经功能障碍的一类疾病^[1]。其发病机制可为先天性或后天性,迄今为止以退变性 LSS 最为常见,患病率随年龄增加而增长,多见于 60~80 岁中老年人,发病率约为 9.3%^[2-3]。LSS 可分为中央型狭窄、侧隐窝狭窄和椎间孔狭窄,其临床症状多样,表现为腰背部静息痛、下肢放射痛和神经源性间歇性跛行(neurogenic intermittent claudication, NIC)等症状的可变组合^[4]。

在 LSS 诊断中,磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术因其优异的软组织分辨率通常作为首选检查。各种影像学参数相继提出,并被广泛应用于 LSS 诊断^[5-6]。然而, MRI 影像资料的拍摄受限于设备一般采取静态平卧位,无法反映出马尾神经和硬膜囊动态机械性压迫的真实情况^[7-8]。研究表明,部分人群虽在 MRI 上呈现出腰椎管狭窄,但并未表现出任何临床症状^[9-10]。此外,协助定性诊断的 MRI 参数也因其测量复杂,与真实症状表现相关性不佳而存在广泛的争议^[11-12]。因此,单独通过 MRI 影像对于 LSS 诊断及治疗方式的选择并不全面,还需结合患者的临床症状及病史^[13]。目前, LSS 诊断中广为应用的基于患者主观描述进行评分的各类问卷(VAS/ODI/JOA 量表)和针对神经功能障碍进行的体格检查易受主观因素的影响^[14-15],其准确性及与真实症状严重程度的相关性也受到质疑^[16]。而行走功能障碍作为 LSS 患者最为显著且最具诊断意义的典型症状,一直以来都缺乏客观而准确的检测方法。近年来,步态分析的出现与流行

使得客观量化 LSS 患者的行走能力成为可能。既往研究表明, LSS 患者行走模式异于常人,主要表现为宽基步态、步态变异性增加、平衡能力减弱等^[17-19],然而其具体机制仍不明确,并在许多方面存在空缺。如何利用步态分析促使临床诊疗中对 LSS 患者行走功能的检测由主观定性判断向客观量化分析的转化,仍待进一步研究。

足底压力分析作为步态分析的重要组成部分,是分析和衡量异常足底压力分布和步态的基础,对行走障碍相关疾病的病因分析、诊断、功能及疗效评定均具有重要意义^[20]。然而,关于 LSS 患者的足底压力分布模式仍鲜有报道,其典型症状 NIC 对足底压力分布的影响仍未阐明。本文采用Footscan®足底压力测试系统针对中央型 LSS 患者进行动态足底压力测试,揭示中央型 LSS 患者在 NIC 症状出现前后足底压力分布及跌倒风险的变化特点,探究其与同年龄段正常人行走足底压力相关参数的差异情况,为足底压力分析应用于 LSS 患者的行走功能判定提供理论依据和数据参考。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

纳入标准:① MRI 影像学检查结果提示 L4~5 节段中央型椎管狭窄,测量硬膜囊横截面积小于 100 mm² 为相对狭窄,小于 75 mm² 为绝对狭窄^[10];② 主诉有间歇性跛行病史,行走至出现症状时间在 2 min 以内,无静息症状;③ 年龄 40~80 岁;④ 症状出现后未经任何侵入性方法治疗;⑤ 近 1 年内无下肢外伤史。

排除标准:①合并脊柱其他节段椎管狭窄;②合并其他脊柱相关疾病,如脊柱侧弯,腰椎滑脱症,脊柱外伤、手术史等;③合并影响行走功能的其他相关疾病,如神经肌肉骨骼、前庭、心肺功能疾患、下肢血管病变、髌、膝、踝关节病变等;④需要拄拐或外力协助下行走。

1.2 一般资料

以2017年10月~2019年4月期间空军军医大学附属西京医院骨科收治的符合上述标准的腰椎管狭窄症患者12名(男10名,女2名)为实验组(LSS组),年龄56~73岁,平均(69.5±7.2)岁;影像学检查发现L4~5节段相对狭窄者4例,绝对狭窄者8例。选取同年龄段健康人群12名为对照组,入组条件为无既往外伤史,无手术史,无运动系统疾病史。LSS组与对照组之间在年龄、身高、体质量、鞋号、体质量指数(body mass index, BMI)、骨密度T值(T-score)等方面无显著差异($P>0.05$),见表1。本研究已得到空军军医大学附属西京医院医学伦理委员会批准,同时获得受试对象或家属签署的足底压力检测知情同意书。

表1 LSS患者与对照组主要人类学指标比较

Tab.1 Comparison of the main demographic parameters in LSS group and control group

指标	LSS组	对照组	P值
年龄	60.00±7.27	59.33±7.40	0.755
身高/cm	168.50±7.48	169.25±8.54	0.932
体质量/kg	71.58±7.01	72.50±9.10	0.977
足长/mm	252.50±16.45	255.00±17.19	0.843
BMI/(kg·m ⁻²)	25.18±1.02	25.22±1.15	0.843
T值	-0.33±0.07	-0.27±0.19	0.932

1.3 实验方法

应用Footscan® 3D足底压力测试系统(RScan® International,比利时)采集数据,测力平板大小为2.00 m×0.40 m×0.02 m,分布16 384个传感器,最小测量面积0.25 cm²,采样频率为125 Hz。每次测量前对测试系统进行校准。测力平板置于中央,前后均放置长度1 m且与测力平板等宽等高的硬质垫子,形成总长4 m行走区域并在其上方铺设伪装垫,以避免靶向作用^[21](见图1)。测量前受试者均进行适应性练习。LSS组每名受试者每次测量分为两个阶段,分别为休息2 min后进行测量和运动至症状产生后进行测量,对照组为休息2 min后进

行测量和运动5 min后进行测量^[19]。测量时受试者裸足、目视前方,以自然放松步态直线行走。每名受试者均取左足的足底压力数据进行分析处理^[22],重复进行上述测量步骤,直到收集到3组有效数据。



图1 足底压力分析系统行走区域示意图

Fig.1 Schematic diagram for walking area of plantar pressure analysis system

1.4 观察评估指标

测力平板配套的Scientific Footscan®软件根据足底解剖结构将足底分为10个区域:第1足趾(toe 1, T1),第2~5足趾(toe 2~5, T2~5),第1~5跖骨(metatarsal 1~5, M1~M5),中足(midfoot, MF),足跟内侧(medial heel, MH),足跟外侧(lateral heel, LH)。此外,为了便于整体比较,根据中足的前后缘将足分为前、中、后3个部分,分别为前足(T1, T2~5, M1~5)、中足(MF)、后足(MH, LH),根据足纵轴将前后足划分为内、外两个部分,分别为内侧(T1, M1, M2, MH)和外侧(T2~5, M3~5, LH),见图2。

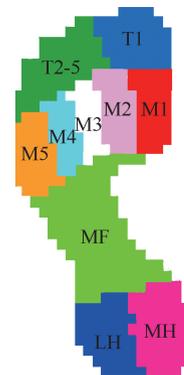


图2 足底10个分区示意图

Fig.2 Schematic diagram for 10 partition zones of the foot

软件同时根据足底各解剖结构触地时间的先后将单足的整个站立相分为4期:①足跟触地期

(initial contact phase, ICP), ② 前足触地期 (forefoot contact phase, FFCP); ③ 全足触地期 (foot flat phase, FFP); ④ 前足离地期 (forefoot push-off phase, FFPOP), 见图 3。

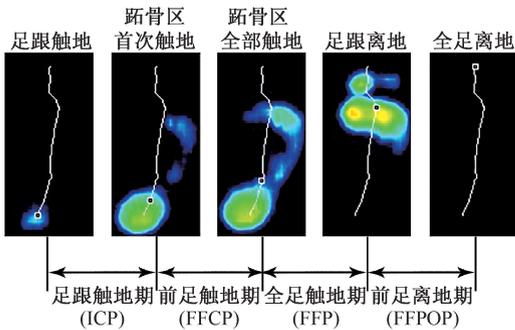


图 3 站立相划分 4 个分期示意图

Fig. 3 Schematic diagram for 4 sub-phases of the stance phase

利用软件收集记录足底压力参数: 各亚期触地时间 (contact time, CT), 各分区接触面积 (contact area, CA), 各分区压强时间积分 (pressure-time integral, PTI), 步向角 (foot progression angle, FPA)。其中, CA 以各区域在足底总面积中的占比 (CA%) 进行校正, CT 以各亚期在单足总站立相中的占比 (CT%) 进行校正。

1.5 数据统计处理

将 3 次有效数据中各参数取平均值作为每名

受试者分析数据, 数据共分为 4 组: LSS 组运动前、LSS 组运动后、对照组运动前、对照组运动后。将数据分别录入 SPSS 23.0 软件, 经 Kolmogorov-Smirnov 单样本检验和散点图检验, 实验数据不符合正态分布。因而 LSS 组运动前后、对照组运动前后在 FPA、CA%、CT%、PTI 等指标上的差异采用 Wilcoxon 符号秩检验进行分析, LSS 组与对照组分别在运动前后相应指标的差异采用 Mann-Whitney U 检验进行分析。P < 0.05 表示差异具有统计学意义。

2 结果

表 2 所示为各组站立相各亚期 CT% 及总 CT 的比较结果, 各组站立相各亚期占总触地时间的比值的比较见图 4。LSS 组在运动前与对照组运动前相比, ICP 的 CT% 出现减小而 FFPOP 的 CT% 增高; LSS 组运动后与对照组运动后相比, ICP 和 FFCP 的 CT% 均较小, FFP 和 FFPOP 的 CT% 增高。LSS 组运动后相对于其运动前, 也出现 ICP 和 FFCP 占比减小, FFP 和 FFPOP 占比增大。在总的 CT 方面, LSS 组运动前、运动后都较对照组显著增加, LSS 组运动后较其运动前 CT 显著增加; 对照组运动前后的各亚期 CT% 和总 CT 均无显著差异。

表 2 各组站立相各亚期占总触地时间比值及总触地时间比较 (* P < 0.05)

Tab.2 Comparison of CT% in the four sub-stance phases and total CT of the foot for each group

站立相	CT%/%				P			
	LSS 组		对照组		P _s		P _g	
	运动前	运动后	运动前	运动后	LSS 组	对照组	运动前	运动后
ICP	7.65±2.16	2.86±1.94	9.68±2.11	9.44±1.89	0.002*	0.158	0.028*	<0.001*
FFCP	5.94±1.72	2.49±1.37	6.36±1.65	6.20±1.78	0.002*	0.272	0.478	<0.001*
FFP	45.96±3.22	49.36±2.96	46.28±3.15	46.54±2.61	0.002*	0.146	0.671	0.033*
FFPOP	40.45±3.18	45.30±3.27	37.76±3.02	37.82±2.60	0.002*	0.875	0.033*	<0.001*
CT/ms	755.66±53.08	858.23±56.40	692.61±44.77	692.02±46.52	0.002*	0.754	0.003*	<0.001*

注: P_g 为使用 U 检验比较 LSS 组与对照组分别在运动前后的 CT% 及 CT, P_s 为使用 Wilcoxon 秩和检验比较 LSS 组运动前后与对照组运动前后的 CT% 及 CT

各组运动前和运动后 FPA 的比较结果见表 3。LSS 组与对照组相比, 在运动前和运动后都表现出 FPA 显著增加; LSS 组运动前后和对照组运动前后的 FPA 均未发现显著差异。

表 4 及图 5 总结了 LSS 组与对照组分别在运动前后足底各区域 PTI 比较结果。对照组运动前后各区域 PTI 均无明显差异。LSS 组运动前较对照组出现 M1~3 区 PTI 增加, 在运动后较对照组出现 M1~4

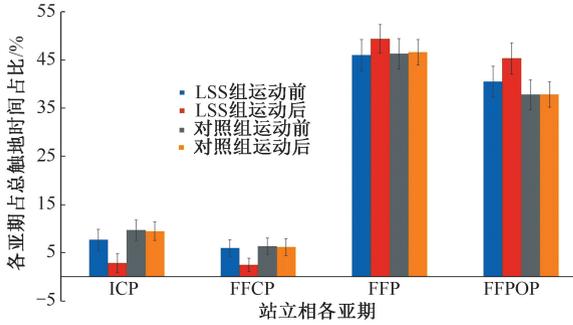


图4 各组站立相各亚期占总触地时间比值比较
Fig.4 Comparison of CT% in the four sub-stance phases of the foot for each group

表4 足底各区域压强时间积分比较 (* P<0.05)

Tab.4 Comparison of the PTI in various zones of the foot for each group

足底区域	PTI/(N·s·cm ⁻²)				P			
	LSS组		对照组		P _s		P _g	
	运动前	运动后	运动前	运动后	LSS组	对照组	运动前	运动后
T1	1.25±0.64	1.27±0.56	1.22±0.83	1.30±0.80	0.785	0.234	0.478	0.755
T2~5	0.24±0.13	0.31±0.16	0.20±0.10	0.23±0.09	0.198	0.317	0.478	0.101
M1	3.18±1.12	4.53±1.20	2.20±0.91	2.21±0.70	0.002*	0.633	0.045*	<0.001*
M2	7.41±1.66	8.72±1.66	6.12±1.66	5.98±1.69	0.002*	0.251	0.033*	<0.001*
M3	10.23±2.62	11.49±2.45	8.22±3.13	7.83±2.67	0.013*	0.142	0.045*	0.001*
M4	5.85±2.08	7.75±1.77	5.27±2.12	5.41±1.97	0.002*	0.325	0.378	0.004*
M5	2.58±1.54	2.63±1.64	2.32±1.19	2.35±1.50	0.385	0.478	0.671	0.713
MF	1.06±0.38	0.84±0.40	0.87±0.41	0.97±0.46	0.090	0.277	0.266	0.514
MH	4.43±1.22	1.92±1.10	4.20±1.36	4.38±1.47	0.002*	0.083	0.590	<0.001*
LH	3.50±0.94	1.83±0.94	3.65±0.89	3.45±1.07	0.002*	0.058	0.630	0.001

注: P_g 为使用 U 检验比较 LSS 组与对照组分别在运动前后的 PTI, P_s 为使用 Wilcoxon 秩和检验比较 LSS 组运动前后与对照组运动前后的 PTI

区 PTI 显著增加,以及 MH、LH 区 PTI 显著减小。LSS 组运动前相对于运动后 M1~4 区 PTI 显著增加, MH、LH 区 PTI 显著减小。

在各区域接触面积占比方面,对照组在运动前后并无统计学差异。LSS 组运动前相对于对照组在

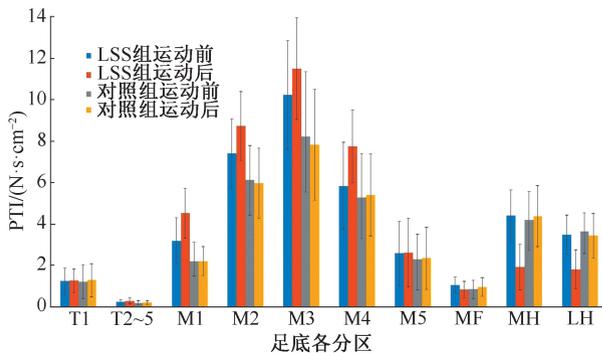


图5 足底各区域压强时间积分比较
Fig.5 Comparison of the PTI in various zones of the foot for each group

表3 各组步向角比较 (* P<0.05)

Tab.3 Comparison of FPA for each group

FPA/(°)			
LSS组		对照组	
运动前	运动后	运动前	运动后
22.96±5.39	23.09±5.33	9.91±3.50	9.85±3.25
P			
实验组	对照组	运动前	运动后
0.723	0.906	<0.001*	<0.001*

注: P_g 为使用 U 检验比较 LSS 组与对照组分别在运动前后的 FPA, P_s 为使用 Wilcoxon 秩和检验比较 LSS 组运动前后与对照组运动前后的 FPA

M2、M3 区 CA% 增加,在运动后 T1、T2~5、M1~4 区 CA% 显著增加, MH、LH 区 CA% 显著减小。LSS 组运动前后的各区域 CA% 比较显示,在运动后 T1、T2~5、M1~4 区 CA% 显著增加, MH、LH 区 CA% 显著减小(见图 6、表 5)。

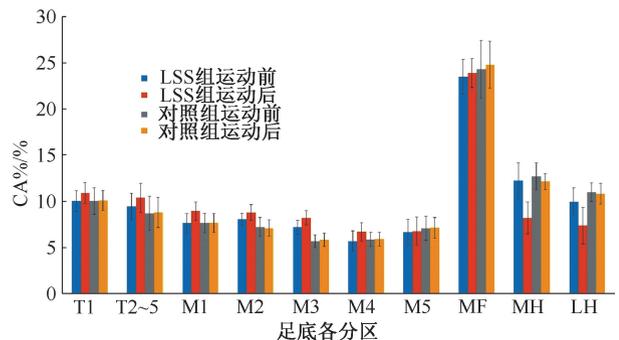


图6 各组足底各区域接触面积比较
Fig.6 Comparison of CA% in various zones of the foot for each group

表 5 各组足底各区域接触面积比较 (* $P < 0.05$)

Tab.5 Comparison of CA% in various zones of the foot for each group

足底区域	CA%/%				P			
	LSS 组		对照组		P_s		P_g	
	运动前	运动后	运动前	运动后	LSS 组	对照组	运动前	运动后
T1	9.99±1.11	10.88±1.17	9.98±1.42	10.06±1.08	0.002*	0.583	0.630	0.039*
T2~5	9.42±1.43	10.37±1.57	8.67±1.85	8.76±1.64	0.002*	0.388	0.319	0.039*
M1	7.62±1.03	8.91±1.02	7.64±1.04	7.63±0.99	0.002*	0.894	0.671	0.002*
M2	8.05±0.64	8.76±0.86	7.19±1.01	7.09±0.88	0.010*	0.239	0.017*	0.001*
M3	7.17±0.75	8.19±0.76	5.66±0.70	5.80±0.73	0.002*	0.099	<0.001*	<0.001*
M4	5.66±1.12	6.70±0.98	5.84±0.77	5.88±0.77	0.002*	0.875	0.178	0.012*
M5	6.64±1.38	6.78±1.52	7.07±1.33	7.11±1.12	0.084	0.937	0.319	0.932
MF	23.47±1.88	23.88±1.59	24.29±3.13	24.76±2.53	0.724	0.136	0.160	0.068
MH	12.22±1.92	8.20±1.73	12.68±1.47	12.11±0.85	0.002*	0.060	0.410	<0.001*
LH	9.97±1.44	7.35±1.98	10.99±1.01	10.80±1.14	0.003*	0.424	0.060	<0.001*

注: P_g 为使用 U 检验比较 LSS 组与对照组分别在运动前后的 CA%, P_s 为使用 Wilcoxon 秩和检验比较 LSS 组运动前后与对照组运动前后的 CA%

3 讨论

LSS 是老年人群中普遍存在和致残的疾病,其病理过程主要为构成腰椎管的骨、韧带和滑膜等组织退变并过度生长,逐渐造成椎管内神经和血管等受压,进而产生一系列临床症状。LSS 患者主诉一般并不典型,可为腰背部和臀部存在的疼痛或麻木、无力,多表现出不同程度的 NIC^[23-24]。MRI 等影像学检查虽可客观呈现腰椎管内组织状态并在解剖上观测到腰椎管狭窄,然而却无法反映患者症状的严重程度^[13],不足以在临床上准确诊断 LSS。NIC 作为中央型 LSS 的主要症状,通常在患者行走时才能发现,该病的诊断则更具有挑战性^[25]。步态分析作为一种新兴检测方式,为客观评估 LSS 患者的行走能力打开一扇新的大门。然而,针对 LSS 步态和性能的参数还未被完全定义,既往研究也多聚焦于下肢关节的运动学和动力学参数^[26-28]。本文使用 Footscan[®] 足底压力测试系统,对中央型 LSS 患者实施动态足底压力测试,针对其运动前后足底压力分布变化及其与健康人的差异进行对比研究,客观评估中央型 LSS 患者足底负重情况,探讨 LSS 患者在动力学和运动学上异常表现的原因,为足底压力分析在 LSS 的应用提供重要参考。

Garbelotti 等^[29]通过对 LSS 患者的步态分析发现,LSS 患者相对于健康人行走时步幅较短,步速较慢,双足站立相时间明显延长,考虑为患者为保持平衡的补偿策略。本文虽未直接测量步幅、步速等

参数,但对触地时间的测量结果表明,LSS 组运动后相对于对照组总触地时间明显延长,运动前并无显著差异。该结果说明 LSS 患者在运动后下肢疼痛、麻木或无力等症状的出现导致其平衡功能较前有所下降,需要更多触地时间来稳定身体以进入下一个步态周期^[30]。本文进而细化考察各个亚期的时间分布,并发现 LSS 组运动前相对于对照组 ICP 较小,FFPOP 较大,LSS 组运动后相对于其运动前以及对照组均出现 ICP、FFCP 显著减小和 FFP、FFPOP 显著增大。LSS 患者倾向于保持腰椎前屈位行走以减轻神经根压迫症状,此步态特征将导致其重心前移^[31-32],故患者需更快地将重心从后足移向前足。总体来说,LSS 组在运动前各亚期时间分布中,前足区域占比增加,后足区域占比减少,而在运动后此特征更为明显,表明 LSS 患者运动初始即保持轻度的腰椎前屈状态,而在连续运动致下肢症状出现后,为减轻症状,患者腰椎进一步前屈,重心相对更为前移,转移过程更加快速,同时也面临着更高的跌倒风险。

本文结果表明,无论运动前后,LSS 组较对照组的 FPA 偏大,更为外旋。FPA 指一侧足纵轴线与前进方向的夹角^[33],其向外旋转提示患者行走时呈“外八字”步态。既往研究证实,LSS 患者行走时呈宽基步态,主要表现为笨拙、蹒跚的行走方式,反映出患者躯干不稳、动态平衡能力受限的特征^[17,19]。此外,大量研究证明,LSS 疾病可影响患者的平衡功能^[34]。因此,本文推测 LSS 组患者以“外八字”步

态行走是为了获得更宽的支撑基底进而保持平衡,减少左右方向的偏移^[35-36]。而 LSS 组在运动前后 FPA 并无显著差异,提示患者的平衡障碍可能持续存在,“外八字”行走已成为患者的习惯性步态。

研究表明,FPA 的改变可影响足底压力分布,当 FPA 外旋时,将促使足底压力向前足、内侧足转移^[37-38]。本文结果在一定程度上与此结论相符。LSS 组相对于对照组在运动前 M1~3 区 PTI 较高, M2~3 区 CA% 增大,表现出压力向足前侧的转移;而 LSS 组运动后相对于运动前出现了 T1、T2~5 区 CA% 增加, M1~4 区 PTI、CA% 增高, MH、LH 区 PTI、CA% 降低,相对于对照组也是如此。该结果表明前足区域压力增加并非仅是 FPA 外旋引起,还受 LSS 患者重心进一步前移的影响,即随着患者下肢症状的出现,腰椎前屈加重,后足区域由于重心前移而接触面积、受力减小,而前足接触面积、受力相应增大以支撑躯体行走。然而,PTI 和 CA% 的研究均并未表现出足内侧受力增加、接触面积增大的趋势,这与文献^[38]中提到的 FPA 外旋可使足底压力向内侧转移的研究结果不符。本文认为,考虑 LSS 患者步态不稳的综合影响,足内外侧因平衡障碍出现压力变化,因而导致每步之间足的内外侧受力、接触面积差异较大,而 3 次观测结果取平均值的过程消除了内外侧压力、接触面积分布的差异,从而影响了测量结果。关于 LSS 患者平衡功能障碍的研究,在 Chiu 等^[35]针对具有平衡功能障碍的老年人,运用足底压力中心(center of pressure, COP)及其运行轨迹描述其足底压力分布及变化,该参数具有综合性、动态性的优势。因而,本文后续将结合 COP 变化情况,针对 LSS 患者的平衡功能开展研究。

综合上述研究结果,本文进一步分析 LSS 患者步态周期及足底压力分布变化的原因。LSS 患者运动初始时即保持轻度腰椎前屈姿势并有一定程度的重心前移,此时躯体可通过调整站立相各亚期时间分布而保持平衡^[39],足底压力分布接近于正常人,但可因“外八字”步态而产生压力向前足的转移^[37];出现下肢症状后,患者为减轻症状而进一步向前屈曲腰椎,导致重心更为前移,此时调整站立相各亚期时间分布不足以代偿,故出现后足触地面积及承重减少,大量依靠前足接触地面受力,足底

压力分布不均,存在高度的跌倒风险。

本文的局限性如下:① 仅对中央型 LSS 患者进行足底压力分析,而临床上以神经根型 LSS 更为多见^[3]。本文主要考察 LSS 患者 NIC 症状前后足底压力分布的变化情况,神经根型 LSS 无法排除单侧肢体疼痛的造成的一系列影响因素,因而未纳入 LSS 组。这也同时造成了样本量过小的问题,故更大样本、更全面的分析是进一步研究方向。② 虽发现 LSS 组在运动前后的差异,并证明 NIC 症状的出现在一定程度上影响足底压力分布,然而 NIC 症状多为进行性加重^[23-24],本文研究并未反映出这一渐进性的变化。③ LSS 患者存在平衡障碍导致部分足底内外侧压力分布存在差异,该差异由于取平均值的过程而被中和。本文仅观测到 LSS 患者前足受力较健康成人明显增加,对足底内外侧的受力情况的分析将是进一步研究的方向。本课题组将结合 COP 运行轨迹,在患者连续行走的情况下,持续监测患者足底压力分布的变化,收集更为全面的实验数据,进而对 LSS 患者的平衡功能、足底内外侧压力分布变化情况进行深入研究,为足底压力分析在 LSS 患者行走功能判定方面的应用提供参考。

4 结论

本文通过对中央型 LSS 患者运动前后分别进行足底压力测试,并与健康成人进行对比,发现 LSS 患者和健康成人的足底压力分布差异如下:① 中央型 LSS 患者在行走时保持腰椎前屈姿势,重心相对健康成人前移,各亚期时间分布中,前足区域占比增加;② NIC 症状的出现可加重中央型 LSS 患者的腰椎前屈姿势,重心进一步前移,前足承受更多压力;③ 中央型 LSS 患者因其平衡障碍,为保持平衡,行走时呈现“外八字”步态。此结论提示,LSS 患者较正常人行走时重心前移,并因 NIC 症状的出现而加重,进一步影响其平衡功能,增加跌倒风险,临床上应对此情况加以重视。

参考文献:

- [1] YABE Y, HAGIWARA Y, ANDO A, *et al.* Chondrogenic and fibrotic process in the ligamentum flavum of patients with lumbar spinal canal stenosis [J]. Spine, 2015, 40 (7): 429-435.
- [2] KALICHMAN L, COLE R, KIM DH, *et al.* Spinal stenosis

- prevalence and association with symptoms; The framingham study [J]. *Spine J*, 2009, 9(7): 545-550.
- [3] SCHROEDER GD, KURD MF, VACCARO AR. Lumbar spinal stenosis: How is it classified? [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2016, 24(12): 843-852.
- [4] VO AN, KAMEN LB, SHIH VC, *et al.* Rehabilitation of orthopedic and rheumatologic disorders. 5. Lumbar spinal stenosis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(3 Suppl 1): S69-76.
- [5] MAMISCH N, BRUMANN M, HODLER J, *et al.* Radiologic criteria for the diagnosis of spinal stenosis; Results of a delphi survey [J]. *Radiology*, 2012, 264(1): 174-179.
- [6] STEURER J, RONER S, GNANNT R, *et al.* Quantitative radiologic criteria for the diagnosis of lumbar spinal stenosis; A systematic literature review [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2011, 12: 175.
- [7] NOWICKI BH, YU S, REINARTZ J, *et al.* Effect of axial loading on neural foramina and nerve roots in the lumbar spine [J]. *Radiology*, 1990, 176(2): 433-437.
- [8] CHOI KC, KIM JS, JUNG B, *et al.* Dynamic lumbar spinal stenosis: The usefulness of axial loaded MRI in preoperative evaluation [J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2009, 46(3): 265-268.
- [9] ISHIMOTO Y, YOSHIMURA N, MURAKI S, *et al.* Associations between radiographic lumbar spinal stenosis and clinical symptoms in the general population; The wakayama spine study [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2013, 21(6): 783-788.
- [10] GENEVAY S, ATLAS SJ. Lumbar spinal stenosis [J]. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2010, 24(2): 253-265.
- [11] GEISSER ME, HAIG AJ, TONG HC, *et al.* Spinal canal size and clinical symptoms among persons diagnosed with lumbar spinal stenosis [J]. *Clin J Pain*, 2007, 23(9): 780-785.
- [12] JARVIK JG, DEYO RA. Diagnostic evaluation of low back pain with emphasis on imaging [J]. *Ann Intern Med*, 2002, 137(7): 586-597.
- [13] WEBER C, GIANNADAKIS C, RAO V, *et al.* Is there an association between radiological severity of lumbar spinal stenosis and disability, pain, or surgical outcome? A multicenter observational study [J]. *Spine*, 2016, 41(2): E78-83.
- [14] CONRAD BP, SHOKAT MS, ABBASI AZ, *et al.* Associations of self-report measures with gait, range of motion and proprioception in patients with lumbar spinal stenosis [J]. *Gait Posture*, 2013, 38(4): 987-992.
- [15] RAGHUNATHAN S, WHITTLE MW. Clinical gait analysis; A review [J]. *Hum Mov Sci*, 1996, 15(3): 369-387.
- [16] ZEIFANG F, SCHILTENWOLF M, ABLE R, *et al.* Gait analysis does not correlate with clinical and MR imaging parameters in patients with symptomatic lumbar spinal stenosis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2008, 9: 89.
- [17] LIM MR, HUANG RC, WU A, *et al.* Evaluation of the elderly patient with an abnormal gait [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2007, 15(2): 107-117.
- [18] PAPADAKIS NC, CHRISTAKIS DG, TZAGARAKIS GN, *et al.* Gait variability measurements in lumbar spinal stenosis patients; Part A. Comparison with healthy subjects [J]. *Physiol Meas*, 2009, 30(11): 1171-1186.
- [19] SASAKI KI, SENDA M, KATAYAMA Y, *et al.* Characteristics of postural sway during quiet standing before and after the occurrence of neurogenic intermittent claudication in female patients with degenerative lumbar spinal canal stenosis [J]. *J Phys Ther Sci*, 2013, 25(6): 675-678.
- [20] RAMIREZ-BAUTISTA JA, HERNÁNDEZ-ZAVALA A, CHAPARRO-CÁRDENAS SL, *et al.* Review on plantar data analysis for disease diagnosis [J]. *Biocybern Biomed Eng*, 2018, 38(2): 342-361.
- [21] 徐超, 严亚波, 赵天峰, 等. 单侧发育性髋关节脱位患儿早期进行 Pemberton 截骨术后的足底压力分析 [J]. *医用生物力学*, 2015, 30(4): 332-338.
- XU C, YAN YB, ZHAO TF, *et al.* Analysis of the plantar pressure in children with unilateral developmental dysplasia of the hip following Pemberton's pericapsular osteotomy at early age [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(4): 332-338.
- [22] XU C, WEN XX, HUANG LY, *et al.* Normal foot loading parameters and repeatability of the Footscan® platform system [J]. *J Foot Ankle Res*, 2017, 10(1): 1-10.
- [23] SCHULTE TL, BULLMANN V, LERNER T, *et al.* Lumbar spinal stenosis [J]. *Orthopade*, 2006, 35(6): 675-692.
- [24] CARLOS B, MATTHEW M, LUKE D, *et al.* Current concepts and recent advances in understanding and managing lumbar spinal stenosis [J]. *F1000Research*, 2019, doi: 10.12688/f1000research.16082.1. eCollection 2019.
- [25] TOMKINS-LANE CC, BATTIÉ MC, HU R, *et al.* Pathoanatomical characteristics of clinical lumbar spinal stenosis [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2014, 27(2): 223-229.
- [26] HAYASHI H, TORIBATAKE Y, MURAKAMI H, *et al.* Gait analysis using a support vector machine for lumbar spinal stenosis [J]. *Orthopedics*, 2015, 38(11): e959-964.
- [27] YOKOGAWA N, TORIBATAKE Y, MURAKAMI H, *et al.* Differences in gait characteristics of patients with lumbar spinal canal stenosis (L4 radiculopathy) and those with osteoarthritis of the hip [J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0124745.
- [28] IGAWA T, KATSUHIRA J, HOSAKA A, *et al.* Kinetic and kinematic variables affecting trunk flexion during level walk-

- ing in patients with lumbar spinal stenosis [J]. PLoS One, 2018, 13(5): e197228.
- [29] GARBELOTTI SA, LUCARELI PR, RAMALHO A, *et al.* An investigation of the value of tridimensional kinematic analysis in functional diagnosis of lumbar spinal stenosis [J]. Gait Posture, 2014, 40(1): 150-153.
- [30] 郑陈帆, 刘艳成, 闫松华, 等. 坐骨神经痛患者的步态特征 [J]. 医用生物力学, 2016, 31(1): 73-77.
 ZHENG CF, LIU YC, YAN SH, *et al.* Gait characteristics of patients with sciatica [J]. J Med Biomech, 2016, 31(1): 73-77.
- [31] HIROSE D, ISHIDA K, NAGANO Y, *et al.* Posture of the trunk in the sagittal plane is associated with gait in community-dwelling elderly population [J]. Clin Biomech, 2004, 19(1): 57-63.
- [32] 刘慧, 张喜林, 周楠, 等. 步态仿真下腰椎间盘退变合并骶髂关节紊乱的有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 46-53.
 LIU H, ZHANG XL, ZHOU N, *et al.* Finite element analysis of lumbar disc degeneration with sacroiliac joint disorder by gait simulation [J]. J Med Biomech, 2017, 32(1): 46-53.
- [33] KHAN SJ, KHAN SS, USMAN J, *et al.* Effects of different foot progression angles and platform settings on postural stability and fall risk in healthy and medial knee osteoarthritic adults [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2018, 232(2): 163-171.
- [34] KIM HJ, CHUN HJ, HAN CD, *et al.* The risk assessment of a fall in patients with lumbar spinal stenosis [J]. Spine, 2011, 36(9): e588-e592.
- [35] CHIU MC, WU HC, CHANG LY, *et al.* Center of pressure progression characteristics under the plantar region for elderly adults [J]. Gait Posture, 2013, 37(3): 408-412.
- [36] MENZ HB, LORD SR. Foot problems, functional impairment, and falls in older people [J]. J Am Podiatr Med Assoc, 1999, 89(9): 458-467.
- [37] MARTA G, MARTIN Z, ONDŘEJ M. The effect of aging and gender on plantar pressure distribution during the gait in elderly [J]. Acta Bioeng Biomech, 2018, 20(4): 139-144.
- [38] LAI YC, LIN HS, PAN HF, *et al.* Impact of foot progression angle on the distribution of plantar pressure in normal children [J]. Clin Biomech, 2014, 29(2): 196-200.
- [39] COCK A, DE CLERCQ D, WILLEMS T, *et al.* Temporal characteristics of foot roll-over during barefoot jogging: Reference data for young adults [J]. Gait Posture, 2005, 21(4): 432-439.