

· 临床研究 ·

腰椎管狭窄平衡功能的足底压力分析[△]

姚德威¹, 成西侠², 邹继伟², 付军², 魏伟², 祝勇刚^{2*}

(1. 海南医学院附属琼海市人民医院骨科, 海南琼海 571400; 2. 空军军医大学附属西京医院全军骨科研究所, 陕西西安 710032)

摘要: [目的] 对比分析具有神经源间歇性跛行 (neurogenic intermittent claudication, NIC) 症状的腰椎管狭窄症 (lumbar spinal stenosis, LSS) 患者与健康人群之间足底压力中心 (center of pressure, COP) 的差异, 验证 COP 在客观评估 LSS 患者行走平衡功能方面的应用价值。[方法] 选取 32 例 L_{4/5} LSS 患者为 LSS 组, 32 例健康成人作为健康人组, 利用 Footscan[®] 足底压力测试系统收集动态足底压力数据, 通过比较 LSS 组与健康人组的 COP 位移和 COP 速度评估 LSS 患者的行走平衡功能。[结果] LSS 组前足触地期 (forefoot contact phase, FFCP) 以及全足触地期 (foot flat phase, FFP) 的 COP 位移和速度均较健康人组显著增加 ($P < 0.05$), 而足跟触地期 (initial contact phase, ICP) 和前足离地期 (forefoot push-off phase, FFPOP) 的 COP 位移和速度的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。[结论] LSS 患者 NIC 症状发作后其平衡功能显著受损, 可以利用 FFCP 期和 FFP 期 COP 的位移和速度对 LSS 患者动态平衡功能进行客观评估。

关键词: 足底压力分析, 足底压力中心, 腰椎管狭窄症, 平衡功能

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2022) 10-0947-04

Plantar pressure analysis on balance function in lumbar spinal stenosis // YAO De-wei¹, CHENG Xi-xia², ZOU Ji-wei², FU Jun², WEI Wei², ZHU Yong-gang². 1. Department of Orthopedics, Qionghai People's Hospital, Hainan Medical College, Qionghai 571400, China; 2. Orthopaedic Research Institute of CPLA, The First Affiliated Hospital, Air Force Military Medical University, Xi'an, 710032, China

Abstract: [Objective] To compare and analyze the difference in the plantar center of pressure (COP) between patients with lumbar spinal stenosis (LSS) accompanied with neurogenic intermittent claudication (NIC) and healthy persons, and verify the application value of COP parameter in objectively evaluating the balance function in LSS. [Methods] A total of 32 patients with L_{4/5} LSS were selected as the LSS group, while the other 32 healthy adults at the same age were selected as the healthy group. Footscan[®] platform system was used to measure the plantar pressure of these subjects during walking. The balance function of LSS patients was evaluated by comparing the center of pressure (COP) displacement and COP velocity between the two groups. [Results] The COP displacement and velocity of the LSS group during the forefoot contact phase (FFCP) and the foot flat phase (FFP) were significantly higher than those of the control group ($P < 0.05$), whereas no significant differences in COP displacement and velocity were observed between the two groups during the initial contact phase (ICP) and forefoot push-off phase (FFPOP). [Conclusion] The balance function of LSS patients after the occurrences of NIC is significantly damaged. Using the displacement and velocity of COP during the FFCP and FFP might achieve an objective assessment of the dynamic balance function of LSS patients.

Key words: plantar pressure analysis, center of pressure, lumbar spinal stenosis, balance function

腰椎管狭窄症 (lumbar spinal stenosis, LSS) 是临床上常见的退行性腰椎疾患之一, 多具有神经源间歇性跛行 (neurogenic intermittent claudication, NIC) 症状^[1]。LSS 患者行走功能水平是反应病情的重要指标, 平衡功能受损是限制其行走能力的重要方面^[2, 3]。足底压力中心 (center of pressure, COP) 是行走过程中足底所受反作用力的综合反应, 机体的平

衡状况可直接影响 COP 的位置及运行轨迹^[4]。目前尚未有研究将足底压力分析应用于 LSS 患者平衡功能的评估, 并且 LSS 患者 NIC 症状出现后 COP 轨迹的变化特点仍未阐明。

本研究采用 Footscan[®] 足底压力测试系统收集 LSS 患者步行过程中的 COP 数据, 分析其与健康成人之间的差异, 客观评估 LSS 患者在行走过程中的

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2022.10.19

△基金项目: 陕西省科技攻关项目 (编号: 2016SF-136)

作者简介: 姚德威, 主治医师, 研究方向: 创伤骨科及骨科康复, (电话) 13617592472, (电子信箱) yaodewei1983@126.com

* 通信作者: 祝勇刚, (电话) 15109115812, (电子信箱) zhuyonggang1979@126.com

平衡功能，为足底压力分析应用于 LSS 的临床诊疗及平衡功能的评估提供理论支持和参考数据。

1 临床资料

1.1 一般资料

回顾性分析 2019 年 3 月—2021 年 3 月于本院接受手术治疗的 LSS 患者，LSS 组纳入标准：(1) 全脊柱影像学检查仅存在 L_{4/5} 节段中央椎管狭窄（椎管中央矢状径 < 13 mm，硬膜囊横截面积 < 100 mm²）^[5]；(2) 有间歇性跛行病史，保守治疗无效；(3) 年龄 45~65 岁，且近 2 年内无下肢外伤史；(4) 无其他影响行走功能的相关疾病，如神经血管肌肉等疾患、下肢关节病变等。健康人组纳入标准：(1) 年龄 45~65 岁；(2) 无骨科相关疾病及手术史；(3) 可独立行走，步态无异常。LSS 组与健康人组各 32 例符合纳入标准纳入本研究，两组一般资料差异无统计学意义 ($P > 0.05$ ，表 1)。本研究获得空军军医大学西京医院伦理委员会的批准，所有受试者或其家属均签署了知情同意书。

表 1 两组患者一般资料与比较

指标	LSS 组 (n=32)	健康人组 (n=32)	P 值
年龄 (岁)	58.71±5.62	59.33±7.14	0.728
身高 (cm)	165.55±7.28	166.15±7.54	0.911
体重 (kg)	71.48±7.14	71.50±8.17	0.905
足长 (mm)	251.53±16.15	255.00±17.23	0.844
足宽 (mm)	103.17±4.56	102.12±5.76	0.732
BMI (kg/m ²)	25.28±1.17	25.12±1.05	0.867
骨密度 (T 值)	-0.37±0.17	-0.35±0.18	0.923

1.2 检测方法

本研究应用 Footscan[®] 足底压力平板系统对受试者进行动态足底压力采集，该系统由数据采集系统与测力平板系统组成。测力平板规格 5.00 m×0.4 m×0.02 m，矩阵形式 256×64，电阻传感器数量 40 960 个，数据采集频率 125 Hz，压强采集区间 0~200 N/cm²。

测试前受试者均进行适应性练习，裸足、目视前方、以自然放松步态、在无人搀扶的状态下，沿足底压力测试平板往返行走 3~5 次，帮助受试者习惯赤足在平板上行走，以避免测试时出现明显的步态调整。适应性训练结束后休息 10 min 进行正式测试。LSS 患者于行走区域连续行走，当自述出现 NIC 症状时继续行走 2 min 并采集足底压力数据，然后嘱患者休息 10 min 后再次重复该过程，共进行 3 次。健康人组以同样流程测试并收集足底压力数据。根据足底各解剖结构触地时间的先后可以将单足的整个站立相分为 4 期：足跟触地期 (initial contact phase, ICP)、前足触地期 (forefoot contact phase, FFCP)、全足触地期 (foot flat phase, FFP) 及前足离地期 (forefoot push-off phase, FFPOP)。Footscan[®] 足底压力平板系统配套的 Scientific Footscan[®] 软件可以记录每时相的起始结束时间，同时还可根据足底压力分布情况，每隔 8 ms 自动生成一个足底压力中心，最终形成足底压力中心轨迹线 (图 1)。软件以坐标形式记录 COP 相对于足底的位置，足纵轴 (y 轴) 为足后跟中点与前足第二、三跖骨头中点的连线，x 轴为经过足后跟中点与 y 轴的垂线。COP 的横坐标对应其相对 y 轴的偏移量 (mm)，COP 的纵坐标对应其生成的时间点 (ms)。

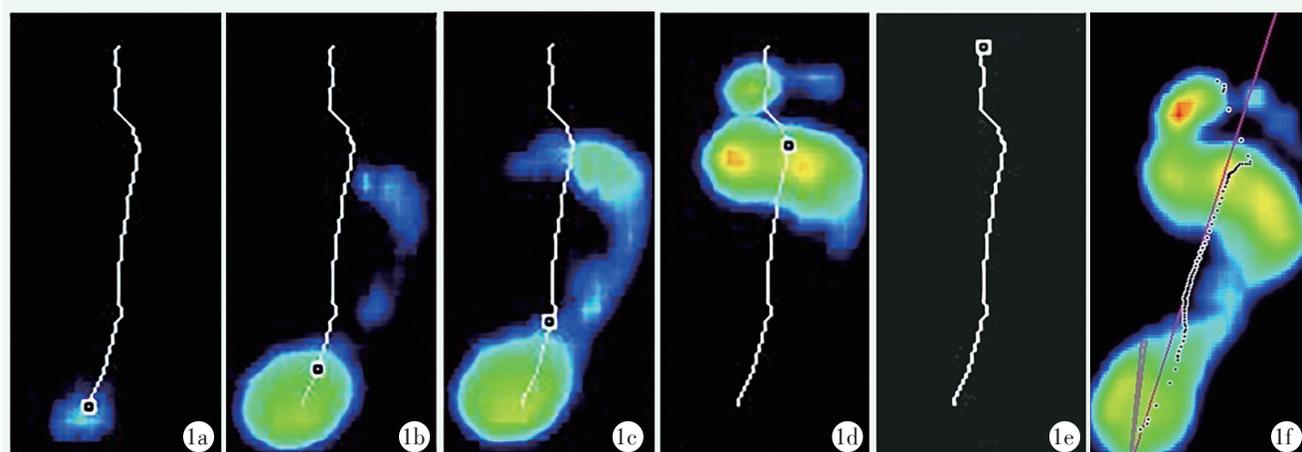


图 1 足底压力中心运行轨迹示意图 1a: 足跟触地 1b: 跖骨区首次触地 1c: 跖骨区全部触地 1d: 足跟离地 1e: 全足离地 1f: 完整的 COP 轨迹

1.3 评价指标

记录站立相4个时期的起始和结束时间，命名为COP_{V1}-COP_{V5}。将软件生成的COP数据录入Matlab 2017 (Mathworks Inc.) 软件中，使用多项式差值法生成COP运动轨迹的连续曲线，并分别计算出每个时期COPX的最大值(max)和最小值(min)，命名为COPX_{max1-4}和COPX_{min1-4}，然后分别计算各期的COP位移(COPX_{max}-COPX_{min})与COP速度(COP位移/时间)。

1.4 统计学方法

使用SPSS 23.0软件进行统计分析。选取LSS组的症状较重侧或优势侧足的COP数据用于最终分析，健康人组计算双侧足COP数据的平均值作为最终数据，将三次代表性测试的平均值纳入统计分析。研究将对比LSS组和健康人组每个时相COP位移和速度的差异。数据经检验，符合正态分布，计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示，采用两独立样本t检验， $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 两组COP轨迹图对比

图2展示了软件生成的健康人组与LSS组的COP典型轨迹图。图2a为健康人组的COP轨迹图，可见COP轨迹为稍向足外侧凸起的平滑曲线。图2b为LSS组的COP轨迹图，可见COP轨迹明显偏离足纵轴，且轨迹趋于紊乱。

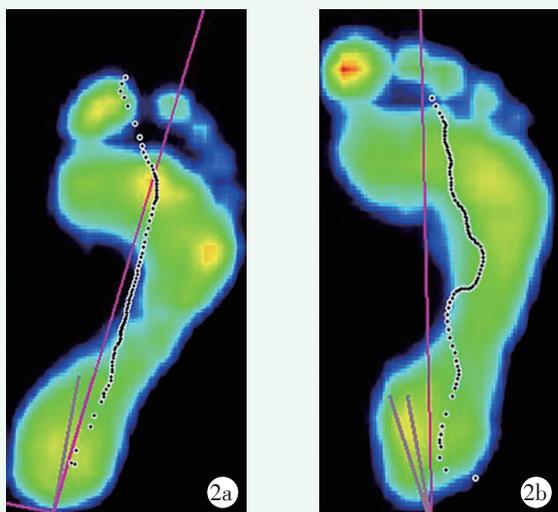


图2 LSS患者与健康人群的COP轨迹图对比
2a: 健康人组受试者COP轨迹图，COP轨迹为稍向足外侧凸起的平滑曲线
2b: LSS组受试者COP轨迹图，COP轨迹明显偏离足纵轴，且轨迹趋于紊乱

2.2 两组COP位移对比

两组不同时相COP位移的对比结果见表2。结果显示，LSS组相对于健康人组在FFCP和FFP两期内的COP位移显著增加($P < 0.05$)，而两组在ICP期和FFPOP期内COP位移的差异无统计学意义($P > 0.05$)。

表2 两组不同时相足底压力中心位移(mm, $\bar{x} \pm s$)与比较

单足触地期	足底压力中心位移		P值
	LSS组 (n=32)	健康人组 (n=32)	
ICP	5.62±2.11	5.14±1.91	0.350
FFCP	3.24±1.15	1.27±0.85	<0.001
FFP	5.72±3.63	2.35±6.87	<0.001
FFPOP	12.64±7.93	13.32±8.43	0.156

2.3 两组COP速度对比

两组不同时相COP速度的对比结果见表3。LSS组相对于健康人组在FFCP和FFP两期内的COP速度显著增加($P < 0.05$)，在ICP期和FFPOP期内差异无统计学意义($P > 0.05$)。

表3 两组不同时相足底压力中心速度($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\bar{x} \pm s$)与比较

单足触地期	足底压力中心速度		P值
	LSS组 (n=32)	健康人组 (n=32)	
ICP	11.92±7.63	10.87±6.64	0.901
FFCP	10.35±5.84	8.14±4.45	<0.001
FFP	3.23±1.87	1.36±0.93	<0.001
FFPOP	16.68±3.23	16.92±2.15	0.517

3 讨论

COP相关参数在分析步态及其代偿机制，评估机体动态稳定性，具有重要的应用价值^[6, 7]。其中，COP位移反映了患者在冠状面上的平衡功能，而COP速度是患者在矢状面上转移足底负重能力的体现^[8, 9]。有研究指出40%~65%的LSS患者伴有步态平衡异常，相对于常人有更高的跌倒风险^[3, 10]。此外，还有研究利用COP对LSS患者NIC症状发作后静止站立的平衡功能进行评估^[11]，发现LSS患者的COP轨迹总长度显著增加，且COP在冠状面上的最大偏移量明显高于正常人。然而尚未有研究分析LSS患者动态平衡功能。

本研究利用Footscan®足底压力系统对LSS患者的COP进行了动态分析，发现LSS患者的FFCP期

和FFP期的COP位移和速度均高于健康人组，而ICP期和FFPOP期的差异则不明显。这一现象可由步态周期的运行模式所解释^[12]。在ICP期和FFPOP期间，人体处于步态周期的双足支撑相，而FFCP期和FFP期间处于单足支撑相。有研究证实，由于LSS患者下肢肌力的不足，或受疼痛、麻木等症状的影响，其症状侧的负重能力明显下降^[13]。因此，在FFCP期和FFP期，患者由于上述原因导致身体重心偏向足外侧，进而造成COP位移的显著增加。

本研究中COP速度的差异也同样证实了LSS患者的平衡功能障碍，LSS患者在FFCP和FFP两期内的COP速度显著大于正常人。由于NIC症状的出现，LSS患者趋于以腰椎前屈的模式行走来缓解症状，继而出现重心前移，患者需更快地将重心从后足移向前足以维持稳定^[2, 9]。这使得患者在矢状面上足底压力负载前移的速度增加，可体现在COP速度的变化上^[13]。因此，LSS患者的平衡功能障碍不仅存在于冠状面，也存在于矢状面上，具有向前方及症状侧跌倒的风险。本研究具有一定的局限性：本研究仅纳入了L_{4/5}节段的LSS患者；老年人多合并下肢关节疾患，限制了本研究的应用；采用COP偏移面积及COP加速度等参数会更为准确^[14]。

综上所述，本研究应用足底压力分析技术，验证了LSS患者在NIC症状发作后其平衡功能显著受损；同时可以利用FFCP期和FFP期COP的位移和速度对其动态平衡功能进行客观评估，对于该疾病的诊疗和功能评估具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] Jensen RK, Andresen A, Brøgger HA, et al. Lumbar spinal stenosis [J]. *Ugeskr Laeger*, 2019, 181 (9): V04180250.
- [2] Sun J, Liu YC, Yan SH, et al. Clinical gait evaluation of patients with lumbar spine stenosis [J]. *Orthop Surg*, 2018, 10 (1): 32-39.
- [3] Thomes E, Robinson HS, Vøllestad NK. Dynamic balance in patients with degenerative lumbar spinal stenosis: a cross-sectional study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2018, 19 (1): 192.
- [4] Kodama K, Yasuda K, Kuznetsov N A, et al. Balance training with a vibrotactile biofeedback system affects the dynamical structure of the center of pressure trajectories in chronic stroke patients [J]. *Frontiers Human Neurosci*, 2019, 13 (1): 84.
- [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] Terra MB, Da Silva RA, Bueno MEB, et al. Center of pressure-based balance evaluation in individuals with Parkinson's disease: a reliability study [J]. *Physiother Theory Pract*, 2020, 36 (7): 826-833.
- [7] Michalak KP, Przekoracka-Krawczyk A, Naskręcki R. Parameters of the crossing points between center of pressure and center of mass signals are potential markers of postural control efficiency [J]. *PLoS One*, 2019, 14 (7): e0219460.
- [8] De Cock A, Vanrenterghem J, Willems T, et al. The trajectory of the centre of pressure during barefoot running as a potential measure for foot function [J]. *Gait Posture*, 2008, 27 (4): 669-675.
- [9] 魏伟, 张扬, 徐超, 等. 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 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35 (3): 338-346.
- [10] 魏伟, 孟冰, 张扬, 等. 步态分析在腰椎管狭窄症中的应用进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (20): 1887-1891.
- [11] 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.
- [12] Ohtsu H, Yoshida S, Minamisawa T, et al. Investigation of balance strategy over gait cycle based on margin of stability [J]. *J Biomech*, 2019, 95: 109319.
- [13] Wei W, Xu C, Yang XJ, et al. Analysis of dynamic plantar pressure before and after the occurrence of neurogenic intermittent claudication in patients with lumbar spinal stenosis: an observational study [J]. *Biomed Res Int*, 2020, 2020: 5043583.
- [14] Hébert-Losier K, Murray L. Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: a systematic review [J]. *Gait Posture*, 2020, 75 (1): 46-62.

(收稿:2021-06-01 修回:2021-10-08)

(同行评议专家: 陈雄生)

(本文编辑: 闫承杰)