

# 产后 12 周内女性步行生物力学特征研究

吴正红<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1</sup>, 齐燕<sup>1</sup>, 文伟<sup>1,2</sup>

1. 上海市养志康复医院(上海市阳光康复中心)盆底康复科, 上海 201600; 2. 上海交通大学附属第一人民医院泌尿外科, 上海 200080

**【摘要】目的** 探索产后 12 周内女性的步行生物力学特征, 为产后精准康复提供建议。**方法** 纳入 31 名产后 12 周内的女性(产后组)和 10 名健康未孕女性(对照组), 通过 VICON 运动分析系统采集两组女性正常行走状态下的步态时空参数, 比较两组受试者在行走过程中的步长、步速、步频、单支撑相/双支撑相占比、摆动相占比、关节被动活动角度和足弓指数。**结果** 两组步态时空参数比较显示, 产后组左摆动相占比显著下降( $P=0.005$ ), 其余时空参数无明显改变(均  $P>0.05$ )。下肢物理评估中, 产后组右侧膝关节屈曲活动度显著高于对照组, 左踝关节跖屈角度显著低于对照组(均  $P<0.05$ ); 其余髋、膝、踝关节活动度两组比较, 差异无统计学意义( $P>0.05$ )。产后组双侧足弓指数均显著高于对照组( $P<0.05$ )。**结论** 产后 12 周内女性存在特征性下肢生物力学改变, 表现为膝关节和足弓支撑的结构稳定性下降。本研究为制定产后精准康复策略提供一定的理论依据。

**【关键词】** 产后女性, 步态时空参数, 产后康复, 下肢生物力学

**【中图分类号】** R714.7 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1672-6170(2026)03-0135-05

**A study of walking biomechanical characteristics of women within 12 weeks postpartum** WU Zheng-hong<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, QI Yan<sup>1</sup>, WEN Wei<sup>1,2</sup> 1. Department of Pelvic Floor Rehabilitation, Shanghai Yangzhi Rehabilitation Hospital (Shanghai Sunshine Rehabilitation Center), Shanghai 201600, China; 2. Department of Urology, The First People's Hospital of Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200080, China

**【Corresponding author】** WEN Wei

**【Abstract】 Objective** To explore the walking biomechanical characteristics of women within 12 weeks postpartum and to provide recommendations for precise postpartum rehabilitation. **Methods** Thirty-one women within 12 weeks postpartum (postpartum group) and 10 healthy nonpregnant women (control group) were included. The spatiotemporal parameters of gait in the normal walking state of the two groups were collected by using Vicon Motion Analysis System. The stride length, stride speed, stride frequency, single-support phase/double-support phase percentage, swing phase percentage, joint passive mobility angle and arch index of the foot were analyzed and compared between the two groups during the walk. **Results** Comparison of spatiotemporal gait parameters between the two groups revealed a significant decrease in the proportion of the left swing phase in the postpartum group ( $P=0.005$ ). No significant changes were observed in other spatiotemporal parameters (all  $P>0.05$ ). In the physical assessment of the lower limbs, the right knee flexion range of motion in the postpartum group was significantly higher than that in the control group, while the left ankle plantar flexion angle was significantly lower than that in the control group (all  $P<0.05$ ). Comparisons of hip, knee, and ankle joint ranges of motion between the two groups showed no statistically significant differences ( $P>0.05$ ). The bilateral arch indices in the postpartum group were significantly higher than those in the control group ( $P<0.05$ ). **Conclusions** Women within 12 weeks postpartum exhibit distinct lower limb biomechanical alterations. It manifests as a decline in the structural stability of knee joints and foot arch support. This study provides some theoretical basis for the development of precise postpartum rehabilitation strategies.

**【Key words】** Postpartum women; Gait spatiotemporal parameters; Postpartum rehabilitation; Lower extremity biomechanics

妊娠与分娩作为女性特殊的生理过程, 涉及女性系统性解剖与生物力学的适应性重构。首先, 孕期激素(如松弛素)的分泌增加可导致全身韧带松弛和关节活动度增加, 该代偿性改变虽为分娩做准备, 却显著削弱了骨盆环的生物力学稳定性<sup>[1]</sup>。其次, 胎儿的生长使母体重心发生迁移, 腰椎前凸增强、骨盆前倾, 进而影响步态模式<sup>[2]</sup>。孕妇通过特征性步态模式(如摇摆步态)代偿解剖结构改变, 而持续性姿势适应可能导致应力累积, 成为产后肌肉

骨骼功能障碍的主要病理基础。

尽管多数产妇通过肌肉力量重建与重心再适应实现步态正常化, 但持续性盆底肌功能障碍、下肢生物力学链紊乱及神经肌肉控制失调可导致迁延性步态异常, 其影响轨迹可持续至产后 5 年<sup>[3]</sup>。分娩过程中盆底肌群及神经的机械性损伤可能导致肌肉力量减弱与运动协调性降低。此外, 产后疼痛如耻骨联合分离、骨盆疼痛及骶髂关节痛等, 可限制活动范围并降低骨盆稳定性, 进而影响步态稳定性<sup>[4-6]</sup>。产后核心肌力减退和骨盆倾斜可能加剧躯干稳定性不足, 形成代偿性步态模式<sup>[3]</sup>。上述改变若未及时干预, 可能增加慢性肌肉骨骼疾病的风险。

当前临床上产后康复过度聚焦于盆底肌群功能重塑、腹直肌分离修复及泌尿生殖系统症状管理, 容易忽视妊娠-分娩过程引发的动态生物力学改

**【基金项目】** 市级医院诊疗技术推广及优化管理项目—上海市级医院康复医学科专科联盟资助(编号: SHDC22023304); 松江区科技攻关项目(编号: 22SJKJGG34); 同济大学“医学+X”交叉研究项目(编号: 2025-0648-YB-01)

**【通讯作者】** 文伟

变,尤其缺乏对产后步态参数偏移及下肢力线异常的系统性物理评估。这种干预模式可能会延缓躯体功能的全面恢复,并通过异常应力传导增加膝关节关节炎、慢性足踝不稳等远期退行性病变的发病风险<sup>[7]</sup>。本研究采用三维动态捕捉系统(VICON,英国)结合下肢物理评估,对比分析产后12周内女性与健康未生育女性在步态时空参数、下肢关节活动度及足弓指数上的差异,探索产后步态及下肢功能特征,为未来整合生物力学与神经肌肉控制训练、构建个性化全周期产后康复体系提供理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料 通过非概率抽样法,选取2024年1

表1 两组一般资料比较

组别	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)	BMI(kg/m <sup>2</sup> )
产后组(n=31)	31.39 ± 4.31	161.68 ± 5.33	60.06 ± 8.81	22.94 ± 2.89
对照组(n=10)	30.7 ± 2.67	163.70 ± 3.68	62.32 ± 12.97	23.23 ± 4.63
t	0.473	-1.114	-0.628	-0.238
P	0.319	0.136	0.267	0.407

**1.2 方法** 受试者在步态分析室完成数据采集。室温(25±2)℃,穿着统一的紧身衣及平底鞋,暴露测量区域,静息10 min,消除干扰;测量身高、体重、下肢关节被动活动角度等基础数据;红外反光标志点粘贴后,静立校准5 s。静态测试:自然站立,获取下肢关节中心坐标;动态测试:以自选舒适速度,完成6次有效步态周期。使用10台相机的三维运动捕捉系统(VICON,英国,型号:MX T40-S,采样频率:100 Hz)和测力平台(AMTI OR6-7,美国,型号:OR6-7,采样频率:2000 Hz)采集受试者的步态时空参数。单支撑相期间的足底压力分布通过 emed 平台采集(emed® ,德国;采样频率:100 Hz)。

下肢运动数据(包括:步长、步速、步频、步宽、支撑相/摆动相时间)通过 IOR 模型进行捕捉<sup>[8]</sup>,14 mm 的光反射标记点分别设置于以下解剖标志位:

~12月就诊于上海市养老康复医院盆底康复科门诊的患者41例。其中产后组31例,纳入标准:产后12周内女性;排除标准:妊娠期间妊娠期高血压、妊娠期糖尿病等合并症,有脊柱、骨盆、四肢畸形或骨折史,不愿意参加研究,无法遵从研究要求;精神和语言能力异常,无法顺利沟通、交流。同期健康未孕女性10例为对照组。两组受试者的年龄、身高、体重和BMI比较,差异均无统计学意义( $P>0.05$ ),见表1。本研究获得上海市养志康复医院(上海市阳光康复中心)医学伦理委员会的批准(养志伦审号:[2023]018号)。所有参与者自愿参与研究,研究目的与流程已向其详细说明,并签署知情同意书。

髌前上棘、髌后上棘、内外踝、跟腱、大转子、胫骨结节中心、股骨内外髁和腓骨头。骨盆段的跟踪通过在髌前上棘和髌后上棘处放置的标记点实现,确保在腹部体积变化的情况下仍能准确捕捉骨盆运动。

下肢物理评估(包括:髋关节、膝关节、踝关节在不同运动状态下的屈伸、内收外展等角度)通过标准通用量角器(精度±1°)进行测量,该测量由同一个治疗师完成,治疗师经过系统培训,有5年的临床工作经验。

通过 visual3D 计算每位被试的步态参数,包含以下步态时空参数:步长、步速、步频、单支撑相/双支撑相占比、摆动相占比;下肢物理评估数据:关节被动活动角度;动力学参数使用 emed 平台计算得到;足弓指数。如图1所示。

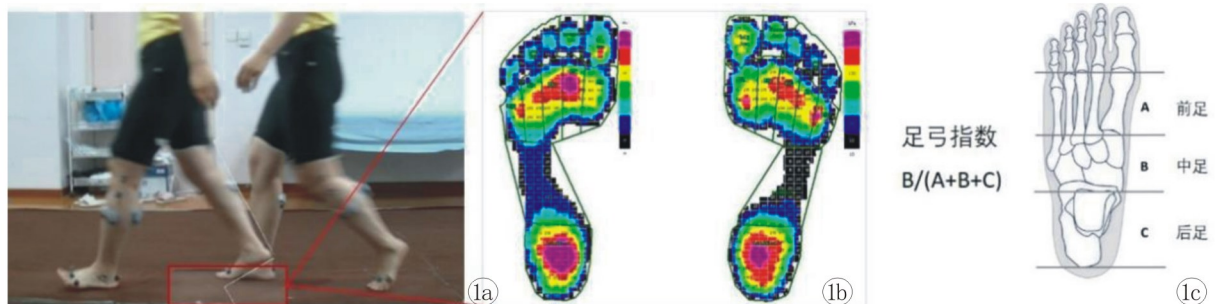


图1 步态捕捉与足底压力采集及足弓指数计算示意图 a:步态过程中标志点布置的三维运动捕捉场景;b:足底压力分布热图;c:足弓指数的计算区域划分示意。足弓指数定义为中足区域(B)面积占整足(A+B+C)面积的比例

**1.3 统计学方法** 采用 SPSS 26.0 统计学软件进行数据分析。计量资料首先使用 Shapiro-Wilk 检验进行正态性检验,符合正态分布的数据用均数±标准差表示,

组间比较采用独立样本  $t$  检验;不符合正态分布的数据用  $M(Q1, Q3)$  表示,组间比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验。 $P<0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 两组时间-空间参数比较** 与对照组比较,产后组的左摆动相占比下降,差异有统计学意义( $P=$

0.005)。其余步态时空参数,包括步长、步速、步频、支撑相、双支撑相、右摆动相及步宽,两组间比较差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。见表 2。

表 2 两组步态时间-空间参数的比较

指标	产后组( $n=31$ )	对照组( $n=10$ )	$t$	$P$
左步长(cm)	57.50 ± 4.39	56.85 ± 2.56	0.442	0.331
右步长(cm)	56.99 ± 4.65	55.08 ± 3.69	1.182	0.122
步速(cm/s)	105.32 ± 9.95	102.54 ± 9.39	0.78	0.220
左步频(步/min)	110.31 ± 7.92	107.74 ± 7.59	0.903	0.186
右步频(步/min)	110.77 ± 7.69	112.85 ± 8.26	-0.731	0.235
左支撑相占比	0.65 ± 0.06	0.65 ± 0.06	0.167	0.434
右支撑相占比	0.65 ± 0.07	0.67 ± 0.06	-0.666	0.255
左双支撑相占比	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.02	1.176	0.123
右双支撑相占比	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.833	0.205
左摆动相占比	0.42 ± 0.04	0.45 ± 0.02	-2.729	0.005
右摆动相占比	0.42 ± 0.04	0.43 ± 0.02	-1.145	0.13
步宽(cm)	10.20 ± 2.4	10.3 ± 1.65	-0.128	0.449

**2.2 两组下肢物理评估指标比较** 产后组右膝关节屈曲活动度显著高于对照组( $P<0.05$ );在踝关节活动方面,产后组左侧跖屈角度显著低于对照组

( $P<0.05$ )。其余下肢物理评估指标,包括髋关节屈伸、外展及膝关节伸展、踝关节背屈等,两组间比较差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。见表 3。

表 3 两组下肢物理评估指标比较( $^{\circ}$ )

指标	产后组( $n=31$ )	对照组( $n=10$ )	统计量	$P$
左髋关节屈曲活动度	123.23 ± 9.08	118.90 ± 7.34	$t=1.365$	0.09
右髋关节屈曲活动度	122.87 ± 9.49	122.3 ± 6.08	$t=0.178$	0.43
左髋关节伸展活动度	11.61 ± 2.42	10.5 ± 1.58	$t=1.359$	0.091
右髋关节伸展活动度	11.26 ± 1.79	10.07 ± 2.21	$t=0.81$	0.211
左髋关节外展(伸膝)	45 ± 5.62	44.5 ± 4.53	$t=0.255$	0.400
右髋关节外展(伸膝)	44.29 ± 6.02	46.60 ± 5.62	$t=-1.071$	0.145
左膝关节屈曲	143.68 ± 6.36	139.70 ± 8.27	$t=1.597$	0.059
右膝关节屈曲	143.48 ± 5.89	138.3 ± 8.82	$t=2.134$	0.02
左膝关节伸展	0(0,0)	0(0,0)	$U=-306$	0.11
右膝关节伸展	0(0,0)	0(0,0)	$U=-306$	0.11
左伸膝踝关节背屈	8(5,12)	9(3.75,10.75)	$U=-331.5$	0.78
右伸膝踝关节背屈	8(5,10.5)	9(7.25,10)	$U=-336.5$	0.90
左屈膝踝关节背屈	17.52 ± 6.60	16.3 ± 4.97	$t=0.534$	0.298
右屈膝踝关节背屈	17.77 ± 7.13	13.90 ± 5.24	$t=1.581$	0.061
左踝关节跖屈	49.71 ± 9.66	55.8 ± 5.63	$t=-1.884$	0.034
右踝关节跖屈	50.13 ± 9.89	53.9 ± 5.84	$t=-1.137$	0.131

**2.3 两组足弓指数比较** 产后组左、右足弓指数均高于对照组,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。见表 4。

表 4 两组足弓指数比较

组别	$n$	左足弓指数	右足弓指数
产后组	31	0.26 ± 0.03	0.26 ± 0.03
对照组	10	0.23 ± 0.03	0.21 ± 0.09
$t$		1.873	1.900
$P$		0.034	0.044

## 3 讨论

本研究通过对比产后女性与健康未育女性的步态时空参数、下肢关节活动度及足部形态学指标,旨在探讨妊娠及分娩对女性下肢生物力学功能产生的潜在影响,结果显示,产后 12 周内女性在步态摆动相、膝关节活动、踝关节跖屈及足弓指数等多个指标上存在显著改变,其下肢功能尚未完全恢复,值得临床关注。这些改变可能通过生物力学链向上或向下波及机体其他部位,导致步行效率降

低、疲劳感提前出现,髋膝踝关节协调性变差、跌倒风险增加,骨盆区域疼痛、下肢关节疼痛,甚至长期功能受限影响女性的心理健康<sup>[9, 10]</sup>。

本研究发现,在步态时空参数方面,产后组左侧摆动相占比显著降低( $P < 0.05$ )。摆动相占比下降通常提示下肢推进效率降低或关节稳定性需求增加。结合本研究结果,产后组左侧踝关节跖屈活动度显著减小,可能导致其蹬地推进力不足,迫使摆动相缩短以维持步态稳定。推测摆动相占比下降可能是一种代偿性的步态适应策略,通过减少单腿支撑相时长,降低因骨盆失衡引发的跌倒风险。

在下肢关节活动度方面,我们发现两处具有临床意义的变化。其一,产后组右侧膝关节屈曲角度增加( $P < 0.05$ ),可能与妊娠松弛素的持续作用导致韧带松弛、关节被动活动范围增加相关,关节稳定性下降<sup>[11]</sup>,这种改变使产后膝关节损伤的风险、跌倒风险较正常女性升高<sup>[12, 13]</sup>。此外,膝关节屈曲角度增加也可能与股四头肌-腘绳肌肌肉力量失衡、产后骨盆不稳、髌骨关节应力改变有关,此变化可能会增加产后膝痛的风险<sup>[14]</sup>。其二,左侧踝关节跖屈活动度显著减小( $P < 0.05$ ),其活动度减小或削弱步行的推进力,与前述左侧摆动相缩短相印证,共同指向产后女性踝关节功能恢复不全的问题。

本研究进一步发现,与对照组比较,产后组双侧足弓指数显著升高( $P < 0.05$ ),考虑可能是妊娠期足弓支撑结构松弛的持续效应<sup>[15]</sup>,也可能与产后腓肠肌萎缩导致足弓稳定性下降有关<sup>[16]</sup>。足弓指数升高会进一步导致步态的稳定性下降,并与远期膝关节疼痛及下腰痛相关<sup>[17]</sup>。此外,妊娠期人体生物力学发生变化和产后哺育婴儿姿势变化,可诱发肌筋膜系统紊乱<sup>[4, 18]</sup>,并通过筋膜链效应、足底筋膜张力改变进一步影响近端关节功能<sup>[19]</sup>,也可能导致产后足弓指数呈现动态变化<sup>[20]</sup>。这可能为阐释产后人群高发的慢性足底疼痛提供了新的机制视角。

本研究揭示了产后人群步态动力学及足踝生物力学的特异性改变,对临床康复具有一定的指导意义。针对产后摆动相缩短、下肢关节活动度改变,推荐采用渐进式拉伸及强化核心肌力训练,增强下肢稳定性<sup>[21]</sup>;对于足弓指数异常者,建议使用足弓支撑辅具以优化足底负荷分布,定期评估预防骨关节退行性病变<sup>[22]</sup>。更重要的是,应建立足-膝-髋-骨盆生物力学链系统评估体系,推动产后康复从碎片化干预向整体运动链功能重建范式转型。

关于产后女性下肢生物力学改变的作用机制较为复杂,横断面设计难以确立妊娠与生物力学改变的因果时序;其次,未纳入核心肌功能等潜在影

响因素的评估;此外,缺乏长期随访数据,无法判断产后下肢功能变化的动态趋势。未来研究可采用三维运动捕捉系统结合表面肌电技术,探索多关节运动控制的时空协同机制,并开展多中心前瞻性队列研究,为产后精准康复提供新的策略。

### 【参考文献】

- [1] Li X, Lu Z, Song Y, et al. Pregnancy-induced gait alterations: meta-regression evidence of spatiotemporal adjustments[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024,12: 1506002.
- [2] Aguiar L, Santos-Rocha R, Vieira F, et al. Comparison between overweight due to pregnancy and due to added weight to simulate body mass distribution in pregnancy[J]. *Gait Posture*, 2015,42(4): 511-517.
- [3] Fukano M, Nomura Y, Tsukahara Y. Does the pregnancy-related adaptation of gait biomechanics after childbirth recover to its pre-pregnancy state?: a systematic review[J]. *Gait Posture*, 2024, 110: 110-121.
- [4] Bagwell JJ, Reynolds N, Smith JA, et al. An exploratory analysis of gait biomechanics and muscle activation in pregnant females with high and low scores for low back or pelvic girdle pain during and after pregnancy[J]. *Clin Biomech*, 2022,97: 105705.
- [5] Anastasio MK, Anastasio AT, Kuller JA. Peripartum pubic symphysis diastasis[J]. *Obstet Gynecol Surv*, 2023,78(6):369-375.
- [6] Hermans S, Paulussen E, Notermans R, et al. Motion analysis in patients with postpartum sacroiliac joint dysfunction: A cross-sectional case-control study [J]. *Clin Biomech (Bristol)*, 2022, 100: 105773.
- [7] Pizzoferrato AC, Thuillier C, Vénara A, et al. Management of female pelvic organ prolapse-Summary of the 2021 HAS guidelines [J]. *J Gynecol Obstet Hum Reprod*, 2023,52(3): 102535.
- [8] Leardini A, Sawacha Z, Paolini G, et al. A new anatomically based protocol for gait analysis in children [J]. *Gait Posture*, 2007, 26(4): 560-571.
- [9] 刘天航, 孙秀丽. 女性脊柱-骨盆形态与盆底功能障碍性疾病 [J]. *中国妇产科临床杂志*, 2021,22(2): 198-200.
- [10] Foti T, Davids JR, Bagley A. A biomechanical analysis of gait during pregnancy[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2000,82(5): 625-632.
- [11] Schauburger CW, Rooney BL, Goldsmith L, et al. Peripheral joint laxity increases in pregnancy but does not correlate with serum relaxin levels[J]. *Am J Obstet Gynecol*, 1996,174(2): 667-671.
- [12] Christopher SM, Cook CE, Snodgrass SJ. What are the biopsychosocial risk factors associated with pain in postpartum runners? Development of a clinical decision tool [J]. *PLoS One*, 2021, 16(8): e0255383.
- [13] Ratnani GR, Patil S, Phansopkar P, et al. A comparative study of knee joint proprioception assessment in 12-week postpartum women and nulliparous women[J]. *Cureus*, 2023,15(11): e48101.
- [14] Gilleard WL. Trunk motion and gait characteristics of pregnant women when walking: report of a longitudinal study with a control group[J]. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2013,13: 71.
- [15] Segal NA, Boyer ER, Teran-Yengle P, et al. Pregnancy leads to lasting changes in foot structure[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2013,92(3): 232-240.