

单侧慢性踝关节不稳患者双侧下肢生物力学特征异常

郭萍¹, 王娟²

<https://doi.org/10.12307/2025.974>

投稿日期: 2024-11-06

采用日期: 2024-12-25

修回日期: 2025-02-24

在线日期: 2025-03-20

中图分类号:

R493; R318; G804.5

文章编号:

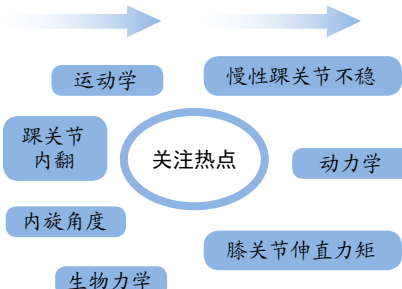
2095-4344(2025)32-06920-07

文献标识码: B

文章快速阅读: 单侧慢性踝关节不稳患者双侧下肢运动学、动力学特征存在异常

研究来源

- 慢性踝关节不稳
- 单侧慢性踝关节不稳
- 下肢
- 生物力学
- 运动学
- 动力学
- 交叉训练



研究分支

- 慢性踝关节不稳
- 踝关节韧带扭伤
- 发病机制
- 生物力学
- 感觉运动障碍
- 交叉训练

文题释义:

慢性踝关节不稳: 是一种以反复扭伤和踝关节“让位”为特征的临床疾病。在初次踝关节外侧扭伤后, 近40%的个体出现脊髓兴奋性降低、本体感觉障碍及神经肌肉控制障碍, 最终发展为慢性踝关节不稳。

生物力学: 运用力学的观点、方法和理论对生物体结构和功能进行研究的生物物理学分支。通过生物力学分析受试者运动质量, 可以为识别异常负荷策略、降低损伤风险提供有价值的信息。

摘要

背景: 研究表明, 单侧慢性踝关节不稳患者存在双侧感觉运动障碍。然而, 双侧感觉运动障碍会对患侧和健侧的生物力学特征造成怎样的影响目前尚未可知。

目的: 探究单侧慢性踝关节不稳患者双侧下肢在进行侧切动作时的运动学和动力学特征。

方法: 招募18例男性单侧慢性踝关节不稳患者和18名男性健康受试者, 慢性踝关节不稳患者分别用患侧和健侧完成90°侧切动作, 健康受试者用优势侧完成90°侧切动作。应用红外高速运动捕捉系统采集侧切过程中下肢运动学参数, 应用三维测力台采集下肢动力学参数, 比较各生物力学变量的差异。

结果与结论: ①与健康受试者相比, 慢性踝关节不稳患者患侧表现出更高的踝关节内翻($P=0.047$)和内旋角度($P=0.046$), 健侧表现出更高的踝关节内翻角度($P=0.049$); 与患侧相比, 慢性踝关节不稳患者健侧的膝关节外翻($P<0.001$)和髌关节内收角度($P=0.046$)显著提高; ②与健康受试者相比, 慢性踝关节不稳患者患侧表现出更高的膝关节伸直力矩($P=0.029$); 与患侧相比, 慢性踝关节不稳患者健侧的踝关节屈力矩显著提高($P=0.027$), 膝关节伸直力矩显著降低($P=0.048$); ③结果提示, 单侧慢性踝关节不稳患者不仅患侧, 健侧也存在下肢生物力学特征异常, 两侧均存在“让位”或复发性踝关节扭伤的潜在风险; 此外, 单侧慢性踝关节不稳患者患侧近端关节冠状面生物力学特征也产生改变。

关键词: 慢性踝关节不稳; 侧切; 运动学; 动力学; 生物力学; 交叉训练

Bilateral lower limb biomechanical abnormalities in patients with unilateral chronic ankle instability

Guo Ping¹, Wang Juan²

¹College of Physical Education, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, Hubei Province, China; ²School of Sports Medicine, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, Hubei Province, China

Guo Ping, Master, Lecturer, College of Physical Education, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, Hubei Province, China

Corresponding author: Wang Juan, Master, Intermediate experimentalist, School of Sports Medicine, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, Hubei Province, China

Abstract

BACKGROUND: Recent studies have shown that patients with unilateral chronic ankle instability have bilateral sensorimotor impairment. However, it is still unknown how bilateral sensorimotor impairment affects the biomechanical characteristics of the affected and unaffected sides.

OBJECTIVE: To investigate the kinematic and kinetic characteristics of the bilateral lower limbs in patients with unilateral chronic ankle instability during lateral cutting maneuver.

METHODS: Eighteen patients with unilateral chronic ankle instability and eighteen healthy subjects were recruited. The patients with chronic ankle instability completed 90° cutting on the affected and healthy sides. The healthy subjects completed 90° cutting on the dominant side. The kinematic parameters of the lower limbs during lateral incision were collected using an infrared high-speed motion capture system, and the kinetic parameters of the lower limbs were collected using a three-dimensional force platform. Paired and independent sample t-tests were used to compare differences in various biomechanical

¹ 汉江师范学院体育学院, 湖北省十堰市 442000; ² 武汉体育学院运动医学院, 湖北省武汉市 430079

第一作者: 郭萍, 女, 1986年生, 湖北省十堰市人, 汉族, 硕士, 讲师, 主要从事运动损伤康复与体育教学研究。

通讯作者: 王娟, 硕士, 中级实验师, 武汉体育学院运动医学院, 湖北省武汉市 430079

<https://orcid.org/0009-0006-7605-455X> (郭萍); <https://orcid.org/0009-0004-6653-5769> (王娟)

基金资助: 湖北省教育厅教学研究项目 (2021407), 项目负责人: 王娟

引用本文: 郭萍, 王娟. 单侧慢性踝关节不稳患者双侧下肢生物力学特征异常 [J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(32):6920-6926.



variables.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Compared with healthy subjects, patients with chronic ankle instability showed higher ankle inversion ($P=0.047$) and internal rotation ($P=0.046$) angles on the affected side, and higher ankle inversion angles ($P=0.049$) on the unaffected side. Compared with the affected side, the knee valgus ($P<0.001$) and hip adduction ($P=0.046$) angles of patients with chronic ankle instability were significantly increased on the unaffected side. (2) Compared with healthy subjects, patients with chronic ankle instability showed higher knee extension moment on the affected side ($P=0.029$). Compared with the affected side, the plantar flexion moment of the ankle on the unaffected side of patients with chronic ankle instability was significantly increased ($P=0.027$), and the extension moment of the knee was significantly reduced ($P=0.048$). To conclude, patients with unilateral chronic ankle instability have abnormal biomechanical characteristics of the lower limbs not only on the affected side but also on the unaffected side, and there are potential risks of “giving way” or recurrence ankle sprains on both sides. Furthermore, patients with unilateral chronic ankle instability also exhibit changes in the biomechanical characteristics of the proximal joints in the coronal plane on the affected side.

Key words: chronic ankle instability; cutting; kinematics; kinetics; biomechanics; cross-training

Funding: Teaching and Research Project of Hubei Province Department of Education, No. 2021407 (to WJ)

How to cite this article: GUO P, WANG J. Bilateral lower limb biomechanical abnormalities in patients with unilateral chronic ankle instability. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2025;29(32):6920-6926.

0 引言 Introduction

踝关节韧带扭伤是常见的肌肉骨骼损伤之一^[1]。大多数踝关节扭伤可损伤踝关节外侧韧带，主要是距腓前韧带和/或跟腓骨韧带，并且是由足部接触时踝关节复合快速及意外的内翻和内旋造成的^[2]。不幸的是，只有一部分个体在踝关节外侧扭伤后完全恢复，无任何残留损伤^[3]，近40%的个体会经历复发性损伤并发展为慢性踝关节不稳^[4]。慢性踝关节不稳包括一系列复杂的感觉知觉、病理机械和运动行为障碍，这些障碍在最初的踝关节外侧扭伤后单独或联合发展^[5]。

与慢性踝关节不稳相关的下肢生物力学改变是导致踝关节“让位”和复发性踝关节外侧扭伤的运动行为因素之一^[5]。具体来说，与健康对照相比，慢性踝关节不稳患者在着陆时出现了更大的踝关节背屈和内翻^[6]、膝关节和髌关节屈曲^[7-8]；此外，在动态运动中，慢性踝关节不稳患者踝关节内旋增大^[9]、踝关节神经肌肉控制减弱^[10]、踝关节跖屈和外翻力矩增大，同时髌关节伸肌力矩和近端关节僵硬增加^[9, 11]。感觉运动系统在维持体位稳定中起着至关重要的作用，它包括各种感觉、运动和中枢整合成分，这些成分参与了身体运动过程中保持关节稳态^[12]。感觉运动障碍包括感觉、运动功能和中枢整合的缺陷^[13]。大量证据表明，慢性踝关节不稳与受伤踝关节的感觉运动障碍有关，导致慢性踝关节不稳患者的姿势不稳定和生物力学缺陷^[14-15]。在最近针对单侧慢性踝关节不稳的双侧评估研究中观察到一个有趣的现象，即单侧慢性踝关节不稳的感觉运动缺陷可以在双侧观察到^[16-17]，可能存在一个中央介导过程参与单侧慢性踝关节不稳的发展，并且导致双侧的损伤。这表明感觉运动障碍不仅存在于损伤肢体，也存在于未损伤肢体^[13]，意味着单侧慢性踝关节不稳患者的生物力学缺陷可能影响对侧的生物力学特征。

踝关节扭伤可能损伤外周机械感受器，导致损伤侧感觉传入神经中断，而外周机械感受器对感知和调节姿势至关重要^[18]。在慢性踝关节不稳中，作为主要机械感

受器之一的肌纺锤体的敏感性可能受损^[19]。研究表明，关节和皮肤传入神经，连同肌肉传入神经和下行脊髓上指令，激活 γ 运动神经元池^[12]。踝关节感觉传入神经的减少可能导致 γ 运动神经元激活受到抑制，进而导致不正确的运动输出^[12]。这些变化可能影响中枢神经系统的加工和整合，导致重组或适应性改变^[20]。由于两个半球之间复杂的相互作用，一个半球可能影响双侧半球的感觉运动功能^[18]。在单侧慢性踝关节不稳患者中观察到双侧姿势控制缺陷为中枢介导的改变提供了进一步的证据^[13]。然而，关于慢性踝关节不稳患者双侧的感觉运动缺陷如何影响患侧和健侧的生物力学特征，目前仍缺乏证据。为此，此次研究从生物力学的角度，调查了单侧慢性踝关节不稳患者双侧下肢的生物力学特征，并与健康受试者进行比较，旨在探究单侧慢性踝关节不稳是否会导致双侧下肢生物力学特征异常，并分析可能机制，为进一步了解慢性踝关节不稳患者双侧生物力学缺陷提供证据支持。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 病例-对照试验，慢性踝关节不稳患者分别用患侧和健侧完成90°侧切动作，健康受试者用优势侧完成90°侧切动作。

1.2 时间及地点 试验于2024年6-9月在武汉体育学院完成。

1.3 对象 采用先验功率分析(G*power 3.1.2)确定整个研究的合适样本量。经过计算，确定32名受试者的样本量以在独立样本t检验条件下实现功率=0.80，效应量=1.05，显著性水平=0.05。考虑到10%的样本脱落率，研究最终选取男性慢性踝关节不稳患者18例，男性健康受试者18名。

慢性踝关节不稳患者纳入标准：①男性，年龄18-30岁，优势侧为右侧；②在12个月前，至少发生过一次单侧严重踝关节扭伤，并引起了疼痛、肿胀等现象，损伤后至少3周内不能参加体育活动；③在过去6个月内，损伤侧踝关节至少出现2次“让位”和/或反复扭伤，自觉踝

关节不稳；④坎伯兰踝关节不稳定工具评分 ≤ 24 分，表明踝关节功能受损^[21]；⑤功能性踝关节不稳定识别评分 ≥ 11 分；⑥前抽屉实验、距骨倾斜实验均为阴性；⑦定期运动，每周 ≥ 3 次，每次 ≥ 30 min；⑧ $18.5 \text{ kg/m}^2 < \text{体质量指数} < 28 \text{ kg/m}^2$ 。

健康受试者纳入标准：①男性，年龄为18–30岁，优势侧为右侧；②无踝关节扭伤史；③坎伯兰踝关节不稳定工具评分=30分，表明踝关节功能良好，无不稳定感^[21]；④功能性踝关节不稳定识别评分=0分；⑤定期运动，每周 ≥ 3 次，每次 ≥ 30 min；⑥ $18.5 \text{ kg/m}^2 < \text{体质量指数} < 28 \text{ kg/m}^2$ 。

排除标准：①下肢有骨折或手术史；②有神经骨骼肌肉系统疾患；③有严重的认知功能受损病史；④在测试过程中数据缺失或不能按要求完成评估者。

所有受试者均被告知测试过程，并签署书面知情同意书。该研究获得武汉体育学院医学伦理委员会同意并批准(No. 2024113)。

1.4 方法

1.4.1 试验数据采集 在测试前由实验人员指导参与者熟悉测试动作，并进行10 min标准化热身，包括5 min的拉伸和在跑步机上以自己舒适的速度慢跑5 min。然后粘贴左右髌骨上棘、左右髌骨上缘、左右髌后上棘、左右股骨大转子、左右大腿4个追踪点、左右股骨外侧髁、左右股骨内侧髁、左右小腿4个追踪点、左右外踝、左右内踝、左右足跟、左右第1跖趾关节及左右第5跖趾关节共38个直径为14 mm的Mark点^[22]。慢性踝关节不稳患者分别用患侧和健侧完成3次90°侧切动作，患侧或健侧肢体的测试顺序随机进行；健康受试者用优势侧完成3次90°侧切动作。慢性踝关节不稳患者侧切动作包括以下两个部分：①参与者站在力板后3 m处的起点，以尽可能快的速度沿跑道跑向力板；②参与者测试腿落在一侧力板，然后迅速向测试腿对侧方向90°转向，随之以最快速度奔跑。完成3次成功的侧切后，选取3次结果的平均值进行分析。每次侧切间隔3 min，以免疲劳对实验结果产生影响。应用9镜头红外高速运动捕捉系统(Vicon, T40, 200 Hz)采集侧切过程中下肢的运动学参数，应用三维测力台(Kistler, 1 000 Hz)采集侧切过程中的下肢动力学参数，见图1。

1.4.2 试验数据处理 使用Visual 3D (C-Motion, Inc) 软件进行运动学和逆动力学分析。使用先前描述的方法创建3D下肢模型^[23]。该模型用于计算3D踝关节、膝关节和髌关节角度和力矩。采用低通巴特沃斯数字滤波器(12 Hz)对标记物轨迹和力板数据进行滤波，该滤波器被认为可以最大限度地减少高冲击活动逆动力学分析过程中的伪影^[24–25]。侧切着陆阶段被定义为参与者患侧/优势

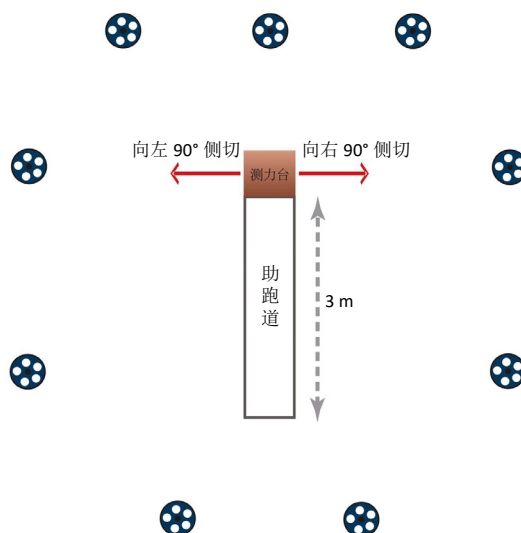


图1 | 在9镜头红外高速运动捕捉系统下受试者做侧切动作示意图
Figure 1 | Cutting action diagram under a 9-lens infrared high-speed motion capture system

侧初始接触力板至膝关节峰值屈曲角度达到峰值这一阶段^[26]。初始接触被定义为垂直地面反作用力 $> 50 \text{ N}$ 的第1时刻^[27]。由于着陆阶段被认为是踝关节扭伤最容易发生的阶段^[27]，因此，试验仅提取着陆阶段的运动学、动力学数据。运动学变量包括3个平面的髌、膝、踝峰值角度；动力学变量包含3个平面的髌、膝、踝力矩均值以及垂直地面反作用力均值。采用欧拉角的方法计算髌、膝、踝的三维角度，关节角度通过远端节段和近端节段的夹角确定。采用逆动力学方法计算关节力矩，所有的动力学变量都使用体质量进行标准化。在关节运动学和动力学变量中，负号(-)表示关节伸展/跖屈、外翻/外展、外旋，正号(+)表示关节屈曲/背伸、内翻/内收、内旋。

1.5 主要观察指标 受试者着陆阶段运动学变量及动力学变量。

1.6 统计学分析 采用SPSS 25.0统计软件进行统计学处理， $P < 0.05$ 视为差异有显著性意义。连续变量以 $\bar{x} \pm s$ 表示。用Shapiro-Wilk检验确认正态性，采用Levene检验确认方差齐性。经过检验，所有数据服从正态分布和等方差。因此，对于人口统计学数据，计量资料组间比较采用独立样本t检验；对于运动学和动力学数据，组内比较采用配对样本t检验，组间比较采用独立样本t检验。所有受试者的信息均进行匿名化处理。该研究经过武汉体育学院生物统计学专家核实。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 共纳入男性单侧慢性踝关节不稳患者18例，男性健康受试者18名。试验过程无脱落，全部进入结果分析。

2.2 受试者基本信息 见表1。

表 1 | 受试者基本信息 (n=18)

项目	慢性踝关节不稳患者	健康受试者	P 值
年龄 ($\bar{x}\pm s$, 岁)	21.6 $\pm$ 1.5	21.0 $\pm$ 1.7	0.254
身高 ($\bar{x}\pm s$, cm)	174.7 $\pm$ 4.0	176.1 $\pm$ 4.1	0.285
体质量 ($\bar{x}\pm s$, kg)	68.4 $\pm$ 5.7	68.7 $\pm$ 5.9	0.880
体质量指数 ($\bar{x}\pm s$, kg/m ²)	22.4 $\pm$ 1.3	22.1 $\pm$ 1.3	0.567
损伤侧 (左侧 / 右侧, n)	10/8		

2.3 试验流程图 见图 2。

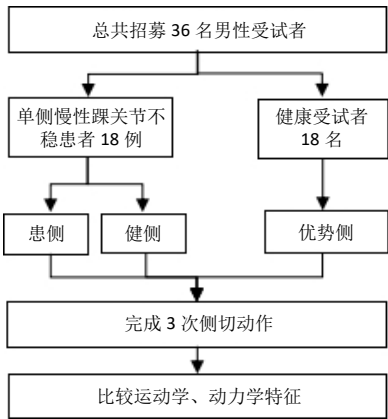


图 2 | 受试者试验流程图
Figure 2 | Trial flow chart

2.4 运动学变量

2.4.1 独立样本 t 检验结果 结果显示：与健康对照组相比，慢性踝关节不稳患者患侧在侧切着陆阶段表现出更高的踝关节内翻 ($P=0.047$) 和内旋角度 ($P=0.046$)，健侧表现出更高的踝关节内翻角度 ($P=0.049$)，见表 2。

表 2 | 两组受试者的运动学变量 ($\bar{x}\pm s$, n=18)

关节运动角度	慢性踝关节不稳患者		健康受试者
	患侧	健侧	优势侧
髋关节峰值角度 (°)			
屈曲 / 伸展	25.85 $\pm$ 4.14	24.87 $\pm$ 4.25	23.90 $\pm$ 5.02
内收 / 外展	4.15 $\pm$ 2.71 ^a	5.15 $\pm$ 2.54	5.18 $\pm$ 2.51
内旋 / 外旋	-8.33 $\pm$ 4.88	-8.64 $\pm$ 5.28	-7.80 $\pm$ 4.04
膝关节峰值角度 (°)			
屈曲 / 伸展	27.13 $\pm$ 4.25	26.80 $\pm$ 4.23	26.89 $\pm$ 5.87
内翻 / 外翻	-2.90 $\pm$ 2.15 ^a	-4.64 $\pm$ 2.58	-4.31 $\pm$ 3.13
内旋 / 外旋	6.12 $\pm$ 3.96	5.08 $\pm$ 3.35	5.48 $\pm$ 3.42
踝关节峰值角度 (°)			
背伸 / 跖屈	-14.07 $\pm$ 2.43	-13.79 $\pm$ 2.50	-13.61 $\pm$ 2.40
内翻 / 外翻	16.36 $\pm$ 4.37 ^b	16.25 $\pm$ 4.10 ^b	13.03 $\pm$ 4.75
内旋 / 外旋	4.50 $\pm$ 2.09 ^b	4.39 $\pm$ 1.93	3.08 $\pm$ 1.76

表注：与慢性踝关节患者健侧比较，^a $P < 0.05$ ；与健康受试者比较，^b $P < 0.05$ 。

2.4.2 配对样本 t 检验结果 结果显示：与患侧相比，慢性踝关节不稳患者健侧在侧切着陆阶段的膝关节外翻 ($P < 0.001$) 和髋关节内收角度 ($P=0.046$) 显著提高，见表 2。

2.5 动力学变量

2.5.1 独立样本 t 检验结果 结果显示：与健康受试者相比，慢性踝关节不稳患者患侧在侧切着陆阶段均表现出更高的膝关节伸直力矩 ($P=0.029$)，见表 3。

表 3 | 两组受试者的动力学变量 ($\bar{x}\pm s$, n=18)

关节力矩	慢性踝关节不稳患者		健康受试者
	患侧	健侧	优势侧
髋关节力矩 (Nm/kg)			
屈曲 / 伸展	-0.93 $\pm$ 0.17	-0.94 $\pm$ 0.19	-0.81 $\pm$ 0.14
内收 / 外展	0.56 $\pm$ 0.18	0.54 $\pm$ 0.19	0.56 $\pm$ 0.19
内旋 / 外旋	-0.35 $\pm$ 0.39	-0.42 $\pm$ 0.21	-0.42 $\pm$ 0.24
膝关节力矩 (Nm/kg)			
屈曲 / 伸展	-1.01 $\pm$ 0.28 ^{ab}	-0.93 $\pm$ 0.19	-0.96 $\pm$ 0.27
内翻 / 外翻	-0.52 $\pm$ 0.16	-0.53 $\pm$ 0.14	-0.53 $\pm$ 0.16
内旋 / 外旋	0.16 $\pm$ 0.10	0.17 $\pm$ 0.09	0.13 $\pm$ 0.07
踝关节力矩 (Nm/kg)			
背伸 / 跖屈	-0.77 $\pm$ 0.08 ^a	-0.82 $\pm$ 0.12	-0.85 $\pm$ 0.14
内翻 / 外翻	0.71 $\pm$ 0.10	0.68 $\pm$ 0.12	0.71 $\pm$ 0.18
内旋 / 外旋	0.23 $\pm$ 0.10	0.21 $\pm$ 0.12	0.20 $\pm$ 0.09
垂直地面反作用力 (N/kg)	1.94 $\pm$ 0.22	1.94 $\pm$ 0.25	1.87 $\pm$ 0.21

表注：与慢性踝关节患者健侧比较，^a $P < 0.05$ ；与健康受试者比较，^b $P < 0.05$ ；垂直地面反作用力采用体质量进行标准化。

2.5.2 配对样本 t 检验结果 结果显示：与患侧相比，慢性踝关节不稳患者健侧在侧切着陆阶段的踝关节跖屈力矩显著提高 ($P=0.027$)，膝关节伸直力矩显著降低 ($P=0.048$)，见表 3。

2.6 不良事件 在测试过程中，两组受试者均未发生跌倒、扭伤、韧带及关节损伤等运动引起的不良事件。

3 讨论 Discussion

此次研究探讨了单侧慢性踝关节不稳患者双侧下肢在进行侧切动作时的运动学和动力学特征，结果发现：在侧切着陆阶段，与健康受试者相比，慢性踝关节不稳患者患侧踝关节内翻、内旋角度以及健侧踝关节内翻角度明显增大；并且慢性踝关节不稳患者健侧膝关节外翻和髋关节内收角度显著高于患侧。这些结果强调了慢性踝关节不稳患者在侧切动作中“让位”发作或复发性踝关节扭伤的潜在机制。此外，在慢性踝关节不稳患者健侧中观察到的膝关节和髋关节冠状面运动学的变化表明，慢性踝关节不稳患者使用了近端关节着陆策略来帮助冠状面踝关节稳定。

3.1 踝关节生物力学特征 在侧切着陆阶段，与健康受试者相比，观察到慢性踝关节不稳患者患侧有明显更大的踝关节内旋。最近 PANAGIOTAKIS 等^[28]发现，在起跳过程中发生的外侧踝关节扭伤表现出两种不同的损伤机制，即踝关节突然内翻和踝关节突然内翻伴踝关节内旋，两者均表现出踝关节跖屈程度较低，后者会对距腓前韧带和跟腓韧带造成劳损，而踝关节内翻只会对单一的跟腓韧带造成劳损。距腓前韧带和跟腓韧带松弛度增加是一种病理性的机械损伤，被视为慢性踝关节不稳患者踝关节反复扭伤的诱因之一^[5]。外侧踝关节扭伤病例报告支持这种损伤机制，因为患有慢性踝关节不稳的个体在脚接触地面时踝关节内旋角度和踝关节内旋速度明显增加，

导致“让位”发作和/或反复踝关节扭伤^[29-31]。与此次研究结果相似, SIMPSON等^[9]发现慢性踝关节不稳患者患侧在侧切任务支撑阶段的踝关节内旋转角度更大。根据现有研究, 触地时踝内旋角度增加可能会损害距腓前韧带和跟腓韧带的完整性, 并导致踝关节外侧扭伤。因此, 在此次研究中, 慢性踝关节不稳患者患侧较大的踝关节内旋验证了复发性踝关节外侧扭伤的发生机制。这一发现可能为临床医生和从业人员制定旨在改善异常踝关节运动模式的康复方案提供有用的见解, 特别是在患有慢性踝关节不稳的个体中, 以减轻着陆任务中复发性损伤的风险。

此次研究还观察到慢性踝关节不稳患者双侧踝关节内翻角度的增加。过大的踝关节内翻角度会引起距骨向内侧移位, 并且导致外踝间隙线、腓骨下段和距骨创面的应力增加, 增加踝关节扭伤风险^[32]。与此次研究结果一致, 有研究发现慢性踝关节不稳患者在着陆过程中预备和反应性踝关节生物力学特征发生显著变化。具体而言, 慢性踝关节不稳患者在着陆前和初始触地时, 患侧踝内翻和内旋角度显著增加, 而落地后踝内翻位移和速度、踝距屈和内翻关节力矩则减少^[6, 33-34]。HERB等^[35]发现, 相较于健康对照组, 慢性踝关节不稳患者在跳跃着陆后107-200 ms踝关节内翻角度更大。关于慢性踝关节不稳患者踝关节内翻角度增加的原因, 多数学者认为是腓骨长肌功能受损所致。腓骨长肌的主要功能是使踝关节外翻, 是限制踝关节过度内翻的主要稳定结构, 腓骨长肌功能受损可能会使慢性踝关节不稳患者锁定前足以及抵抗踝关节过度内翻角度的能力下降^[36]。另外, 慢性踝关节不稳患者踝关节外侧韧带内的感觉感受器损伤会降低 γ 运动神经元对肌纤维敏感性的调控能力^[37], 延长腓骨长肌对踝关节异常位置的反应时间, 使它无法及时提供踝关节外翻力矩, 导致更大的内翻角度^[38]。

3.2 近端关节生物力学特征 相比之下, 此次研究中组间膝关节和髌关节矢状面运动学没有明显差异。以往的研究报道, 着陆动作中, 慢性踝关节不稳患者在足部触地之前和触地期间, 膝关节和髌关节的屈曲角度高于健康受试者^[39-40]。此外, 慢性踝关节不稳患者着陆时髌关节力矩和刚度增加, 垂直地面反作用力幅度减小也有报道^[7-8, 39]。在动态任务中, 近端关节的运动学和动力学适应与慢性踝关节不稳有关, 这增加了对膝关节和髌关节的依赖, 以减弱冲击力和控制踝关节运动^[8]。这很可能是与慢性踝关节不稳相关的感觉知觉障碍构成了这种保护性运动策略的基础, 目的是在动态任务中避免患侧踝关节处于不稳定位置。然而, 对近端节段的依赖增加可能导致踝关节定位异常, 并导致关节扰动, 其程度足以导致“让位”发作或复发性外侧踝关节扭伤。虽然此次测试没有观察

到先前在慢性踝关节不稳中报道的着陆过程中膝关节和髌关节屈曲的增加, 但结果的差异可能归因于测试任务的差异。例如, 报道中近端节段适应的研究使用了最大前跳着地或降落高度超过30 cm^[7, 39-40]。因此, 此次研究使用的侧切着陆任务可能不会引起报道中的慢性踝关节不稳患者相似的近端节段关节运动学, 因为该着陆高度不能复制先前研究中使用的着陆任务的机械要求。

在相关研究中, 此次研究首次评估了双侧近端关节冠状面生物力学特征, 结果显示慢性踝关节不稳患者膝关节和髌关节冠状面运动学的组内差异。慢性踝关节不稳患者健侧膝关节外翻和髌关节内收角度显著高于患侧。膝关节外翻和髌关节内收增加这一结果表明, 慢性踝关节不稳患者试图将健侧近端关节定位到一个有利的位置, 在着陆过程中降低质心并协助踝关节稳定^[7]。此外, 着陆前的这些近端节段适应也可以解释先前在内翻扰动中观察到的内侧/外侧和垂直地面反作用力和加载率的减少^[6]。然而, 支持这一观点的数据有限, 需要更多的研究来充分了解膝关节和髌关节在着陆后的稳定踝关节和下肢当中的作用。

此次研究还发现慢性踝关节不稳患者患侧膝关节力矩均高于健康受试者和健侧。既往研究也报道了类似的结果, 即慢性踝关节不稳患者采用近端到远端关节力衰减策略^[6], 虽然这些运动适应的长期发展目前尚不清楚。与慢性踝关节不稳相关的近端节段动力学变化增加了对近端关节的依赖, 以减弱冲击力, 并被认为是一种保护性的动态运动策略, 以避免感知到的不稳定位置^[8]。然而, 在动态运动中对近端关节的相对依赖可能会加剧踝关节定位异常的风险, 导致复发性踝关节外侧扭伤^[11, 39]。

这些发现表明, 受伤踝关节的生物力学缺陷可能影响对侧肢体。几种机制可以解释慢性踝关节不稳患者生物力学的双侧变化。人们注意到单侧训练可以改善双侧肢体的功能^[41], HALE等^[42]研究发现, 在慢性踝关节不稳未损伤侧进行单侧平衡训练可以增强双侧平衡, 为该机制提供了进一步的支持。这种被称为“交叉训练”的机制表明, 通过锻炼、电刺激或运动想象产生的高强度、单侧、自愿收缩可能会影响对侧肢体神经元件的功效^[41]。长时间的训练可以激活神经回路, 慢性地改变对侧肢体的运动通路, 并导致功能改善; 相反, 一侧的损伤可能会影响对侧。“交叉训练”似乎涉及脊柱和脊髓上调节。相关皮质机制的参与涉及一个复杂的网络, 包括半球间连接和源自初级运动皮质的同侧皮质脊髓纤维, 这些神经通路在单侧运动中产生驱动对侧肌肉的神经冲动中起着至关重要的作用^[43]。功能磁共振成像显示在单侧激活过程中, 双侧对侧运动区的激活相似, 暗示存在半球间的相互作用^[44]。

此外,运动神经元的激活受关节传入、肌肉、皮肤和脊髓上指令的调节^[12]。高 γ 运动神经元激活的肌纺锤体将改善反馈和前馈控制来调节姿势^[45]。然而,踝关节扭伤可能损伤踝关节复合体的机械感受器,包括肌梭、高尔基腱器、鲁菲尼末梢和帕西尼氏体^[46],导致受伤侧的感觉传入神经减少或不准确。因此,踝关节复杂传入事件的减少可能有助于抑制运动神经元的激活^[12]。虽然从身体各个部位接收到的感觉信息的整合在很大程度上被认为是从脊髓水平开始的,但一些感觉信息直接传递到皮质而不需要突触^[12]。感觉输入的减少有助于脊髓和脊髓上水平的整合,导致重组或适应性改变和运动输出的减少^[20]。虽然来自初级运动皮质的皮质脊髓纤维主要控制对侧运动,但少量纤维向下移动到同侧并控制同侧运动,这可能影响慢性踝关节不稳患者的双侧生物力学特征^[18]。此外,ZHANG等^[47]发现单侧慢性踝关节不稳患者双踝疼痛阈值较高。基于弥漫性有害抑制控制理论,在异位有害刺激后,疼痛通路存在抑制调节,这种调节涉及到背侧网状亚核及其向宽动态范围神经元的下行投射。简而言之,感觉输入的减少可能导致中枢神经系统的适应、重组或抑制,这些变化可能潜在地影响单侧慢性踝关节不稳的双侧生物力学特征。

诚然,研究存在一些不足之处:首先,由于不同性别之间存在生物力学差异,研究仅纳入了男性受试者以降低异质性,因此,研究结果可能不适合女性;其次,由于研究招募的受试者都是年轻活跃的个体,目前的发现只能推广到身体活跃和年轻的人群;第三,没有充分考虑到优势侧与非优势侧的差异对个体生物力学的影响;最后,尽管研究许多变量具有显著性,但 P 值接近0.05,这可能表明实际效果比较微弱。因此未来研究需要纳入更多样本量进一步验证结论。

3.3 研究意义 此次研究对单侧慢性踝关节不稳患者患侧、健侧进行了测试,并选取健康受试者的优势侧进行对比。结果显示,在侧切 90° 着陆阶段,与健康受试者相比,慢性踝关节不稳患者患侧踝关节内翻、内旋角度以及健侧踝关节内翻角度明显增大;并且慢性踝关节不稳患者健侧膝关节外翻和髌关节内收角度显著高于患侧。这些结果强调了慢性踝关节不稳患者在侧切动作中“让位”发作或复发性踝关节扭伤的潜在机制。此外,在慢性踝关节不稳患者健侧中观察到的膝关节和髌关节冠状面运动学的变化表明,慢性踝关节不稳患者使用了近端关节着陆策略来帮助冠状面踝关节稳定。然而,无法确定健侧生物力学异常与患侧损伤的先后顺序,未来研究可进行前瞻性实验进一步明确。在临床康复中,不应忽视单侧慢性踝关节不稳健侧的康复评估与训练,近端关节冠状面稳定性训练应被纳入康复策略中。

结论: 不仅患侧,单侧慢性踝关节不稳患者的健侧也存在下肢生物力学特征异常,两侧均存在“让位”或复发性踝关节扭伤的潜在风险;单侧慢性踝关节不稳患者患侧近端关节冠状面生物力学特征也产生改变。

作者贡献: 文章实验设计者和论文撰写者为郭萍,王娟负责资料收集和数据分析,通讯作者王娟对全文进行审校、写作指导以及撰写修改。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 文章撰写遵守了《非随机对照临床试验研究报告指南》(TREND声明)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发表宗旨。

4 参考文献 References

- [1] ROOS KG, KERR ZY, MAUNTEL TC, et al. The Epidemiology of Lateral Ligament Complex Ankle Sprains in National Collegiate Athletic Association Sports. *Am J Sports Med.* 2017;45(1):201-209.
- [2] KUDO S, AOYAGI T, KOBAYASHI T, et al. Ultrasound Imaging of Subtalar Joint Instability for Chronic Ankle Instability. *Healthcare (Basel).* 2023; 11(15):2227.
- [3] WIKSTROM EA, BROWN CN. Minimum reporting standards for copers in chronic ankle instability research. *Sports Med.* 2014;44(2):251-268.
- [4] DOHERTY C, BLEAKLEY C, HERTEL J, et al. Recovery From a First-Time Lateral Ankle Sprain and the Predictors of Chronic Ankle Instability: A Prospective Cohort Analysis. *Am J Sports Med.* 2016;44(4):995-1003.
- [5] HERTEL J, CORBETT RO. An Updated Model of Chronic Ankle Instability. *J Athl Train.* 2019;54(6):572-588.
- [6] SIMPSON JD, STEWART EM, RENDOS NK, et al. Anticipating ankle inversion perturbations during a single-leg drop landing alters ankle joint and impact kinetics. *Hum Mov Sci.* 2019;66:22-30.
- [7] DOHERTY C, BLEAKLEY C, HERTEL J, et al. Single-leg drop landing movement strategies in participants with chronic ankle instability compared with lateral ankle sprain ‘copers’. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(4):1049-1059.
- [8] KIM H, SON SJ, SEELEY MK, et al. Altered Movement Biomechanics in Chronic Ankle Instability, Coper, and Control Groups: Energy Absorption and Distribution Implications. *J Athl Train.* 2019;54(6):708-717.
- [9] SIMPSON JD, KOLDENHOVEN RM, WILSON SJ, et al. Ankle kinematics, center of pressure progression, and lower extremity muscle activity during a side-cutting task in participants with and without chronic ankle instability. *J Electromyogr Kinesiol.* 2020;54:102454.
- [10] SIMPSON JD, STEWART EM, MACIAS DM, et al. Individuals with chronic ankle instability exhibit dynamic postural stability deficits and altered unilateral landing biomechanics: A systematic review. *Phys Ther Sport.* 2019;37:210-219.
- [11] KIM H, SON SJ, SEELEY MK, et al. Kinetic Compensations due to Chronic Ankle Instability during Landing and Jumping. *Med Sci Sports Exerc.* 2018;50(2):308-317.
- [12] PETERKA RJ. Sensory integration for human balance control. *Handb Clin Neurol.* 2018;159:27-42.

- [13] HU X, FENG T, LI P, et al. Bilateral Sensorimotor Impairments in Individuals with Unilateral Chronic Ankle Instability: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med Open*. 2024;10(1):33.
- [14] KHALAJ N, VICENZINO B, HEALES LJ, et al. Is chronic ankle instability associated with impaired muscle strength? Ankle, knee and hip muscle strength in individuals with chronic ankle instability: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2020;54(14):839-847.
- [15] SONG K, JANG J, NOLTE T, et al. Dynamic reach deficits in those with chronic ankle instability: A systematic review and meta-analysis. *Phys Ther Sport*. 2022;53:40-50.
- [16] SOUSA A SP, SILVA M, GONZALEZ S, et al. Bilateral compensatory postural adjustments to a unilateral perturbation in subjects with chronic ankle instability. *Clin Biomech (Bristol)*. 2018;57:99-106.
- [17] SIMPSON JD, RENDOS NK, STEWART EM, et al. Bilateral spatiotemporal postural control impairments are present in participants with chronic ankle instability. *Phys Ther Sport*. 2019;39:1-7.
- [18] WARD S, PEARCE AJ, PIETROSIMONE B, et al. Neuromuscular deficits after peripheral joint injury: a neurophysiological hypothesis. *Muscle Nerve*. 2015;51(3):327-332.
- [19] SOUSA A SP, LEITE J, COSTA B, et al. Bilateral Proprioceptive Evaluation in Individuals With Unilateral Chronic Ankle Instability. *J Athl Train*. 2017;52(4):360-367.
- [20] SUTTMILLER AMB, MCCANN RS. Neural excitability of lower extremity musculature in individuals with and without chronic ankle instability: A systematic review and meta-analysis. *J Electromyogr Kinesiol*. 2020;53:102436.
- [21] HILLER CE, REFSHAUGE KM, BUNDY AC, et al. The Cumberland ankle instability tool: a report of validity and reliability testing. *Arch Phys Med Rehabil*. 2006;87(9):1235-1241.
- [22] CHEN P, WANG L, DONG S, et al. Can Symmetry of Single-Leg Vertical Jump Height Represent Normal Lower Limb Biomechanics of Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? *Sports Health*. 2024;16(4):596-605.
- [23] 陈鹏, 左会武, 王玲, 等. 前交叉韧带重建术后运动员单腿垂直跳跃高度对称性掩盖其异常下肢生物力学 [J]. *中国运动医学杂志*, 2023,42(12): 939-947.
- [24] WANG L, CHEN P, DING Y, et al. Effects of Kinesio taping on lower limb biomechanical characteristics during unexpected jumping in patients with chronic ankle instability. *Scand J Med Sci Sports*. 2024;34(1):e14566.
- [25] ZHANG S, WANG L, LIU X, et al. Effects of Kinesio taping on lower limb biomechanical characteristics during the cutting maneuver in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction. *PLoS One*. 2024;19(3):e0299216.
- [26] LEE H, HAN S, HOPKINS JT. Balance Training With Stroboscopic Glasses and Neuromechanics in Patients With Chronic Ankle Instability During a Single-Legged Drop Landing. *J Athl Train*. 2024;59(6):633-640.
- [27] LEPLEY LK, WOJTYK EM, PALMIERI-SMITH RM. Combination of eccentric exercise and neuromuscular electrical stimulation to improve biomechanical limb symmetry after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Biomech (Bristol)*. 2015;30(7):738-747.
- [28] PANAGIOTAKIS E, MOK KM, FONG DT, et al. Biomechanical analysis of ankle ligamentous sprain injury cases from televised basketball games: Understanding when, how and why ligament failure occurs. *J Sci Med Sport*. 2017;20(12):1057-1061.
- [29] GEHRING D, WISSLER S, LOHRER H, et al. Expecting ankle tilts and wearing an ankle brace influence joint control in an imitated ankle sprain mechanism during walking. *Gait Posture*. 2014;39(3):894-898.
- [30] LI Y, KO J, ZHANG S, et al. Biomechanics of ankle giving way: A case report of accidental ankle giving way during the drop landing test. *J Sport Health Sci*. 2019;8(5):494-502.
- [31] REMUS A, CAULFIELD B, DOHERTY C, et al. A laboratory captured "giving way" episode in an individual with chronic ankle instability. *J Biomech*. 2018;76:241-246.
- [32] ZHANG Z, ZHANG M. Effect of different ankle braces on lower extremity kinematics and kinetics following special-induced fatigue for volleyball players with functional ankle instability. *Heliyon*. 2023;9(6):e16380.
- [33] SIMPSON JD, STEWART EM, MOSBY AM, et al. Lower-Extremity Kinematics During Ankle Inversion Perturbations: A Novel Experimental Protocol That Simulates an Unexpected Lateral Ankle Sprain Mechanism. *J Sport Rehabil*. 2019;28(6):593-600.
- [34] SIMPSON JD, STEWART EM, TURNER AJ, et al. Neuromuscular control in individuals with chronic ankle instability: A comparison of unexpected and expected ankle inversion perturbations during a single leg drop-landing. *Hum Mov Sci*. 2019;64:133-141.
- [35] HERB CC, GROSSMAN K, FEGER MA, et al. Lower Extremity Biomechanics During a Drop-Vertical Jump in Participants With or Without Chronic Ankle Instability. *J Athl Train*. 2018;53(4):364-371.
- [36] KIKUMOTO T, SUZUKI S, TAKABAYASHI T, et al. Center of Pressure Deviation during Posture Transition in Athletes with Chronic Ankle Instability. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(8):5506.
- [37] ALKASLASI MR, PICCUS ZE, HAREENDRAN S, et al. Single nucleus RNA-sequencing defines unexpected diversity of cholinergic neuron types in the adult mouse spinal cord. *Nat Commun*. 2021;12(1):2471.
- [38] HILLER CE, NIGHTINGALE EJ, LIN CW, et al. Characteristics of people with recurrent ankle sprains: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2011;45(8):660-672.
- [39] SON SJ, KIM H, SEELEY MK, et al. Movement Strategies among Groups of Chronic Ankle Instability, Coper, and Control. *Med Sci Sports Exerc*. 2017;49(8):1649-1661.
- [40] KIM H, SON SJ, SEELEY MK, et al. Altered movement strategies during jump landing/cutting in patients with chronic ankle instability. *Scand J Med Sci Sports*. 2019;29(8):1130-1140.
- [41] CUYUL-VÁSQUEZ I, ÁLVAREZ E, RIQUELME A, et al. Effectiveness of Unilateral Training of the Uninjured Limb on Muscle Strength and Knee Function of Patients With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis of Cross-Education. *J Sport Rehabil*. 2022;31(5):605-616.
- [42] HALE SA, FERGUS A, AXMACHER R, et al. Bilateral improvements in lower extremity function after unilateral balance training in individuals with chronic ankle instability. *J Athl Train*. 2014;49(2):181-191.
- [43] CIRER-SASTRE R, BELTRÁN-GARRIDO JV, CORBI F. Contralateral Effects After Unilateral Strength Training: A Meta-Analysis Comparing Training Loads. *J Sports Sci Med*. 2017;16(2):180-186.
- [44] RUDDY KL, LEEMANS A, WOOLLEY DG, et al. Structural and Functional Cortical Connectivity Mediating Cross Education of Motor Function. *J Neurosci*. 2017;37(10):2555-2564.
- [45] ABBOTT EM, STEPHENS JD, SIMHA SN, et al. Attenuation of muscle spindle firing with artificially increased series compliance during stretch of relaxed muscle. *Exp Physiol*. 2024;109(1):148-158.
- [46] WU X, SONG W, ZHENG C, et al. Morphological study of mechanoreceptors in collateral ligaments of the ankle joint. *J Orthop Surg Res*. 2015;10:92.
- [47] ZHANG R, ZHANG X, CHEN Y, et al. Current perception threshold testing in chronic ankle instability. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):453.

(责任编辑: WZH, ZN, WL, LCH)