

文章编号: 1004-7220(2024)05-0931-08

# 单侧功能性踝关节不稳男性连续纵跳落地时 下肢生物力学及偏侧性研究

王子龙<sup>a</sup>, 张芷琪<sup>a</sup>, 孟令越<sup>a</sup>, 卢梦雅<sup>a</sup>, 包佳威<sup>b</sup>, 张秋霞<sup>a\*</sup>, 孔翎宇<sup>a\*</sup>  
(苏州大学 a. 体育学院; b. 数学与科学学院, 江苏 苏州 215006)

**摘要:**目的 探讨单侧功能性踝关节不稳 (functional ankle instability, FAI) 人群在连续纵跳 (continuous vertical jump, CVJ) 落地过程中的下肢生物力学特征以及下肢偏侧性, 与健康人群进行对比。方法 选取 14 名单侧 FAI 男性作为实验组, 匹配 14 名无踝关节损伤男性为对照组, 两组均执行 30 次 CVJ 落地任务。运用 Vicon 和 Kistler 设备分别对两组受试者在第 1、15、30 次 CVJ 落地过程中的下肢运动学、动力学特征进行同步采集, 对数据采用 2×3 混合方差分析。结果 FAI 患者在执行 CVJ 落地任务时, 患侧肢体与健康人群的运动学、动力学特征无明显差异, 但在 vGRF 峰值 SI 上表现出更高的偏侧性。尽管随着跳落任务次数的增加和疲劳程度的上升, 人体会调整下肢动作模式, 但这种调整似乎并未对 FAI 患者患侧下肢的生物力学特征和下肢偏侧性产生明显影响。结论 研究结果为预防 FAI 人群踝关节反复扭伤或者伤后重返赛场前的康复训练提供理论依据。在 FAI 患者的康复训练中应重视纠正下肢偏侧性, 以减少潜在的长期损伤风险, 并考虑生物力学适应性以实现全面康复。

**关键词:** 功能性踝关节不稳; 连续纵跳; 生物力学; 偏侧性; 运动损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.020

## Biomechanical and Lateralized Lower Limb Kinematics of Males with Unilateral Functional Ankle Instability During Continuous Vertical Jump Landing

WANG Zilong<sup>a</sup>, ZHANG Zhiqi<sup>a</sup>, MENG Lingyue<sup>a</sup>, LU Mengya<sup>a</sup>, BAO Jiawei<sup>b</sup>, ZHANG Qiuxia<sup>a\*</sup>, KONG Lingyu<sup>a\*</sup>

(a. School of Physical Education; b. School of Mathematics and Science, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China)

**Abstract: Objective** This study investigated lower limb biomechanics and lateral asymmetry during the continuous vertical jump (CVJ) landing process in individuals with unilateral functional ankle instability (FAI) and compared these characteristics with those of healthy individuals. **Methods** Fourteen males with unilateral FAI were selected as the experimental group, and 14 males without ankle joint injury were matched to the control group. Both the groups performed 30 CVJ landing tasks. Lower limb kinematic and kinetic characteristics during the 1<sup>st</sup>, 15<sup>th</sup>, and 30<sup>th</sup> CVJ landings were synchronously collected using Vicon and Kistler equipment, and a 2×3

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-05-20

基金项目: 江苏高校哲学社会科学研究重大项目 (2023SJZD143), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX23\_3205)

通信作者: 张秋霞, 教授, E-mail: qxzhang@suda.edu.cn; 孔翎宇, 初级康复治疗师, E-mail: kly9710@163.com

\* 为共同通信作者

mixed analysis of variance was adopted for the data. **Results** In the execution of CVJ landing tasks, patients with FAI demonstrated no significant differences in the kinematic and kinetic characteristics of the affected limbs compared with healthy controls. However, a greater degree of lateral asymmetry was observed in the FAI group, particularly in the symmetry index (SI) of the vGRF peak. Despite the increase in the number of jump landings and consequent increase in fatigue levels, which led to adjustments in lower limb movement patterns, these adjustments did not appear to have a significant impact on the biomechanical characteristics and asymmetry of the affected limb in patients with FAI. **Conclusions** This study provides a theoretical basis for the prevention of recurrent ankle sprains in patients with FAI, as well as rehabilitation training prior to their return to sports. These findings underscore the importance of addressing lower limb asymmetry in the rehabilitation training of patients with FAI to reduce the risk of potential long-term injuries. When formulating rehabilitation plans for patients with FAI, particular attention should be paid to the correction of lower limb asymmetry with consideration of biomechanical adaptability under different states to achieve a more comprehensive rehabilitation outcome.

**Key words:** functional ankle instability; continuous vertical jumps; biomechanics; laterality; sports injuries

踝关节扭伤是体育运动中常见的运动损伤之一,通常在跳跃等高强度运动中出现,受伤风险高达 25%~50%<sup>[1-2]</sup>。若初次扭伤后未得到适当治疗,踝关节将继续受到慢性疼痛和局部水肿等负面影响,甚至无法正常控制踝关节的运动,并逐步发展为功能性踝关节不稳(functional ankle instability, FAI),出现本体感觉丧失和神经肌肉控制能力下降等问题<sup>[3-4]</sup>。这些问题会进一步增加踝关节的扭伤概率,形成踝关节反复扭伤的恶性循环,影响运动表现和生活质量<sup>[5]</sup>。

纵跳作为体育运动的基本动作之一,对体能评估和康复训练计划制定至关重要<sup>[6-7]</sup>。连续纵跳(continuous vertical jump, CVJ)作为纵跳的一种,涉及多次起跳和着地缓冲。其着地阶段不仅吸收冲击力,还为下一次起跳积累能量<sup>[8]</sup>。因此,精准的着地姿势和合理的关节协调对于维持 CVJ 动作质量至关重要。然而, CVJ 重复次数增加会导致下肢肌肉逐渐疲劳,引发跳跃性能下降,增加关节损伤的风险<sup>[9]</sup>。既往研究表明, CVJ 重复次数增加能够导致健康人群下肢生物力学特征随之发生变化<sup>[10]</sup>。对于 FAI 患者,其本体感觉和神经肌肉控制可能存在障碍,在执行高强度的重复性跳跃落地任务时,跳跃重复次数增加可能加剧踝关节受伤风险<sup>[11]</sup>。

偏侧性,即不对称性,是指人体左右两侧的运动组织和大脑功能存在差异<sup>[12]</sup>。研究显示,后天因素对偏侧性的影响更为显著<sup>[13]</sup>。长期的偏侧性运动可能引起肌肉失衡和关节承受过度压力,从而引发慢性疼痛和身体不适,进而影响个体的生活质量

和心理健康<sup>[14]</sup>。目前,偏侧性在运动控制等多个学科领域的研究已开展<sup>[12]</sup>;但针对 FAI 患者下肢偏侧性的研究,还较为有限。

本文通过生物力学测试评估 FAI 患者在 CVJ 落地过程中患侧的运动学、动力学特征与健康人群的差异,并结合与损伤相关的载荷率等指标探究 FAI 患者两侧下肢在 CVJ 落地过程中的偏侧性,为科学训练和康复提供理论依据。本文做出如下假设:① FAI 患者在 CVJ 落地过程中患侧的运动学、动力学特征与健康人群的匹配侧存在差异;② FAI 患者在 CVJ 落地时的下肢偏侧性较健康人群更高;③ 相较于健康人群, FAI 患者患侧生物力学特征随着 CVJ 落地次数增加而产生变化。

## 1 研究方法

### 1.1 实验对象

借助 G\*Power 3.1.9 软件,结合既往研究以及本文使用的统计学方法,预估研究所需样本量。功效(power)、I 类误差 $\alpha$ 、效应量分别设置为 0.95、0.05、0.4,计算得出样本量为 18 人;同时考虑 20% 的无效样本,得出最小样本量为 22 人。根据国际踝关节协会的筛选标准<sup>[15]</sup>,通过坎伯兰踝关节不稳定性量表(Cumberland ankle instability tool, CAIT)得分并结合前抽屉试验等方法,招募 14 名男性单侧 FAI 受试者,纳入实验组(FAI 组);其中,篮球专项 5 人,羽毛球专项 5 人,足球专项 4 人。根据 FAI 组受试者的形态学特征和运动背景,匹配 14 名无踝关节损伤的男性作为对照组,并对应 FAI 组受试者患侧选

择了匹配侧。在实验前所有受试者均被告知测试过程,并签署知情同意书。本研究已获苏州大学伦理委员会批准(SUDA20221005H03)。受试者基本情况见表1。

表1 受试者基本情况 (\* $P < 0.05$ )

Tab. 1 Basic information of subjects

参数	FAI组( $n = 14$ )	对照组( $n = 14$ )
年龄/岁	24.7±1.5	24.0±1.0
身高/cm	179.8±8.2	178.4±5.8
BMI/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	23.5±2.0	23.6±1.6
CAIT评分	20.1±1.8	29.1±0.7*
患侧(左/右)	8/6	—

FAI组选入标准为:①过去1年内单侧踝关节至少扭伤1次,且感觉不稳定;②无严重下肢损伤史<sup>[16]</sup>,脚踝扭伤除外;③CAIT $\leq 24$ 分<sup>[17]</sup>;④只有一侧踝关节存在FAI。FAI组排除标准:①双侧踝关节扭伤<sup>[17]</sup>;②下肢有急性病理症状;③下肢有手术史<sup>[18]</sup>;④平衡功能障碍<sup>[16]</sup>;⑤先天性关节畸形;⑥距骨倾斜或踝关节前抽屉试验结果呈阳性。

对照组纳入标准:①CAIT $\geq 28$ 分<sup>[17]</sup>;②与FAI组受试者形态学特征和运动背景相匹配。对照组排除标准:①CAIT $< 28$ 分;②下肢有手术史;③试验前1个月内有急性关节损伤。

## 1.2 实验仪器

采用Vicon三维摄像运动捕捉系统(采样频率100 Hz)和Kistler三维测力台(采样频率1 kHz)同步采集数据。采用Vicon系统中CGM 23下肢模型<sup>[19]</sup>。

## 1.3 实验流程

受试者穿着实验室测试用鞋和紧身衣裤。热身结束之后,粘贴28个直径为14 mm标记点(见图1)。

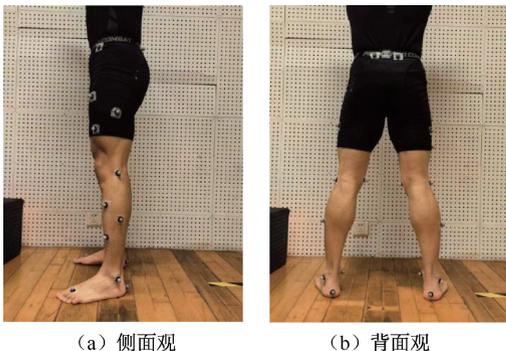


图1 标记点粘贴  
 Fig. 1 Marker point pasting (a) Side view, (b) Back view

基于既往研究<sup>[10]</sup>及本文的可行性,选取30次CVJ作为测试动作(见图2)。取每名受试者30次CVJ的第1、15、30次动作进行分析。

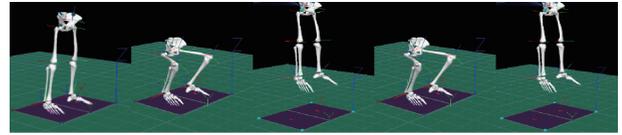


图2 动作示意图  
 Fig. 2 Action diagram

## 1.4 指标选取

利用Visual 3D软件对Vicon系统采集的原始数据进行运动学及逆动力学分析。采用4阶低通Butterworth滤波器平滑处理三维坐标和力台数据,下肢关节角度的计算采用欧拉角法<sup>[20]</sup>。着地瞬间定义为垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF)超过50 N的初始时刻<sup>[21]</sup>。

本文的主要观察指标如下:①受试者在初始着地和vGRF峰值时刻髋、膝、踝关节在矢状面和额状面的关节角度;②经体重(body weight, BW)标准化后的vGRF峰值;③经身高(body height, BH)标准化后的纵跳最大高度,采用腰点法进行计算<sup>[22]</sup>;④垂直方向的载荷率,垂直方向载荷率=vGRF峰值/着地时刻到达vGRF峰值的时间<sup>[12]</sup>;⑤对称指数(symmetry index, SI),量化左右两侧的差异<sup>[23]</sup>。本文主要计算vGRF峰值和载荷率的偏侧性:

$$SI = \frac{| \text{健(对)侧} - \text{患(匹配)侧} |}{0.5(\text{健(对)侧} + \text{患(匹配)侧})} \times 100\%$$

## 1.5 统计分析

使用SPSS 26对数据进行分析,以(均数 $\pm$ 标准差)形式进行描述性统计。采用Shapiro-Wilk检验数据的正态分布性,若满足则对受试者基本资料采用独立样本 $t$ 检验进行比较,若不满足则使用Mann-Whitney检验。采用 $2 \times 3$ 混合方差分析(mixed-ANOVA),以组别(FAI组与对照组)为组间因素, CVJ落地次数(第1、15、30次)为组内因素,若发现组间和组内因素存在交互效应,则进一步分析简单效应。若无交互效应,则分析主效应,通过LSD进行事后比较。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

## 2 研究结果

### 2.1 两组受试者髋关节生物力学特征

在着地瞬间和vGRF峰值时刻,在髋关节屈曲角度指标上观察到了次数的主效应( $P=0.002$ ,

$P=0.001$ ),通过事后比较发现,在着地瞬间第15次CVJ髋关节屈曲角度大于第1次和第30次( $P=0.010, P=0.001$ );在vGRF峰值时刻第30次髋关节屈曲角度小于第1次和第15次( $P=0.002, P=0.001$ ),见表2。

表2 CVJ跳落着地髋关节角度(\* $P<0.05$ )

Tab.2 Hip joint angles during CVJ landing on the ground

髋关节指标	阶段	FAI组( $n=14$ )		对照组( $n=14$ )		主效应		交互效应
		患侧	匹配侧	组别	次数	组别×次数		
着地瞬间 CVJ								
屈伸角/(°)	第1次	21.61±11.01	22.32±12.61					
	第15次	24.28±9.41	28.01±9.52	$P=0.469$	$P=0.002^*$	$P=0.649$		
	第30次	18.40±8.70	21.49±10.71					
内收外展角/(°)	第1次	-9.48±3.14	-11.37±4.14				$P=0.199$	$P=0.889$
	第15次	-9.61±2.30	-11.89±5.01					
	第30次	-10.04±3.37	-10.86±5.37					
vGRF峰值时刻 CVJ								
屈伸角/(°)	第1次	43.29±10.81	39.84±13.15	$P=0.785$	$P=0.001^*$	$P=0.153$		
	第15次	41.80±7.32	47.72±12.39					
	第30次	32.23±9.93	32.97±14.71					
内收外展角/(°)	第1次	-12.02±3.63	-13.61±5.29	$P=0.422$	$P=0.070$	$P=0.920$		
	第15次	-12.43±3.96	-13.46±6.05					
	第30次	-10.84±2.53	-12.15±5.86					

注:髋关节屈曲(+)/伸展(-),髋关节内收(+)/外展(-)。

### 2.2 两组受试者膝关节生物力学特征

在着地瞬间和vGRF峰值时刻,在膝关节屈曲角度指标上观察到了次数的主效应( $P=0.018, P=0.001$ ),通过事后比较发现,在着地瞬间第

15次膝关节屈曲角度大于第1次和第30次( $P=0.011, P=0.028$ );在vGRF峰值时刻第30次膝关节屈曲角度小于第1次和第15次( $P=0.001, P=0.005$ ),见表3。

表3 CVJ跳落着地膝关节角度(\* $P<0.05$ )

Tab.3 Knee joint angles during CVJ landing on the ground

膝关节指标	阶段	FAI组( $n=14$ )		对照组( $n=14$ )		主效应		交互效应
		患侧	匹配侧	组别	次数	组别×次数		
着地瞬间 CVJ								
屈伸角/(°)	第1次	18.36±9.56	20.83±5.01					
	第15次	22.47±8.00	24.30±10.26	$P=0.506$	$P=0.018^*$	$P=0.860$		
	第30次	18.61±8.39	19.31±7.05					
内翻外翻角/(°)	第1次	2.13±3.79	3.60±5.22				$P=0.403$	$P=0.829$
	第15次	2.13±4.16	4.03±6.28					
	第30次	2.37±3.70	3.19±3.93					
vGRF峰值时刻 CVJ								
屈伸角/(°)	第1次	54.07±10.90	52.25±6.55	$P=0.835$	$P=0.001^*$	$P=0.300$		
	第15次	51.31±9.03	54.36±5.61					
	第30次	46.39±7.62	43.67±10.79					
内翻外翻角/(°)	第1次	1.92±7.63	5.28±9.62	$P=0.179$	$P=0.902$	$P=0.504$		
	第15次	1.38±5.88	6.78±10.45					
	第30次	2.27±6.32	5.41±8.63					

注:膝关节屈曲(+)/伸展(-),膝关节内翻(+)/外翻(-)。

### 2.3 两组受试者踝关节生物力学特征

在着地瞬间和 vGRF 峰值时刻,在踝关节内翻角度指标上观察到了次数的主效应 ( $P=0.016$ ,  $P=0.002$ );在 vGRF 峰值时刻,在踝关节背屈角度指标上观察到了次数的主效应 ( $P=0.003$ ),通过事

后比较发现,在着地瞬间,第 15 次 CVJ 踝关节的内翻角度在时大于第 1 次和第 30 次 ( $P=0.008$ );在 vGRF 峰值时刻,第 1 次 CVJ 踝关节的背屈大于第 30 次 ( $P=0.006$ );第 1 次 CVJ 踝关节的内翻角度小于第 15 次和第 30 次 ( $P=0.003$ ,  $P=0.039$ ),见表 4。

表 4 CVJ 跳落着地踝关节角度 (\* $P<0.05$ )

Tab.4 Ankle joint angles during CVJ landing on the ground

踝关节指标	阶段	FAI 组 ( $n=14$ )		对照组 ( $n=14$ )		主效应		交互效应
		患侧	匹配侧	患侧	匹配侧	组别	次数	组别×次数
着地瞬间 CVJ								
跖屈背屈角/(°)	第 1 次	-15.57±3.82	-13.35±7.63			$P=0.711$	$P=0.494$	$P=0.686$
	第 15 次	-13.22±5.23	-11.99±13.61					
	第 30 次	-12.26±6.30	-13.06±9.09					
内翻外翻角/(°)	第 1 次	0.08±3.84	0.11±1.86			$P=0.904$	$P=0.016^*$	$P=0.907$
	第 15 次	1.31±2.76	1.03±3.09					
	第 30 次	0.58±3.93	0.43±2.61					
vGRF 峰值时刻 CVJ								
跖屈背屈角/(°)	第 1 次	24.77±3.88	25.80±5.07			$P=0.338$	$P=0.003^*$	$P=0.287$
	第 15 次	23.45±5.75	26.81±5.61					
	第 30 次	21.81±5.07	21.75±5.27					
内翻外翻角/(°)	第 1 次	0.92±4.13	2.29±1.94			$P=0.200$	$P=0.002^*$	$P=0.512$
	第 15 次	1.73±3.78	3.80±2.75					
	第 30 次	1.76±4.46	3.21±2.77					

注:踝关节背屈(+)/跖屈(-),踝关节内翻(+)/外翻(-)。

### 2.4 两组受试者 vGRF 峰值和载荷率特征

在 CVJ 跳落着地后的 vGRF 峰值和载荷率指标上均未观察到统计学差异 ( $P>0.05$ ),见图 3。

### 2.5 两组受试者 vGRF 峰值和载荷率 SI

在 vGRF 峰值的 SI 上观察到了组别的主效应,通过事后比较发现,FAI 组数值更高 ( $P=0.039$ ),见表 5。

### 2.6 两组受试者纵跳高度

通过比较两组的起跳高度发现了次数的主效应 ( $P<0.001$ );通过事后比较发现,受试者的最大跳跃高度随着跳跃重复次数的增加逐渐降低 ( $P<0.001$ ),见表 6。

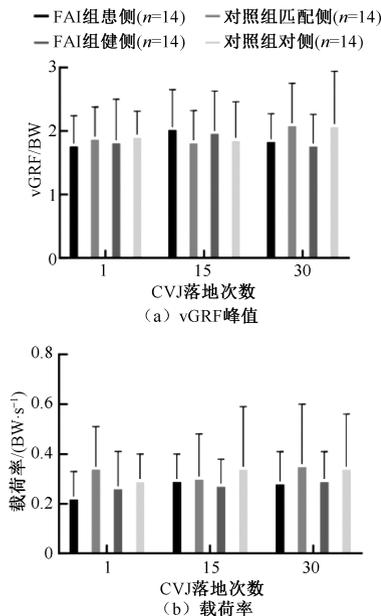


图 3 CVJ 跳落着地 vGRF 峰值和载荷率比较  
 Fig.3 Comparison of peak vGRF and load rate during CVJ jump landing (a) Peak vGRF, (b) Load rate

## 3 讨论

### 3.1 FAI 患者与健康人群 CVJ 落地的生物力学差异分析

于走、跑而言,跳跃对下肢关节的挑战更为严峻。由于踝关节是人体承受末端重量的关键关节,在执行 CVJ 落地任务时承担了重要的功能,包括支撑、稳定等。研究表明,当人体进行跳跃着地动作时,机体会承受较大的地面冲击力,一般为体重的 3~5 倍<sup>[24]</sup>。因此,跳跃动作与踝关节扭伤之间被认为存在密切联系。既往研究证实,踝关节不稳定可能会影响运动的表现<sup>[25]</sup>。但本文发现,FAI 患者在

表5 CVJ跳落着地vGRF峰值和载荷率SI(\* $P < 0.05$ )

Tab. 5 Symmetry index of peak vGRF and load rate during CVJ landing on the ground

指标	阶段	FAI组( $n=14$ )	对照组( $n=14$ )	主效应		交互效应
				组别	次数	组别×次数
vGRF峰值SI//%	第1次	29.13±17.93	18.22±16.47	$P=0.039^*$	$P=0.154$	$P=0.582$
	第15次	24.70±26.21	11.34±12.12			
	第30次	19.35±16.21	13.79±11.44			
载荷率SI/%	第1次	29.44±16.53	27.56±18.80	$P=0.500$	$P=0.887$	$P=0.361$
	第15次	34.83±30.21	22.35±23.10			
	第30次	29.29±18.97	32.52±27.35			

表6 CVJ最大高度(\* $P < 0.05$ )

Tab. 6 Maximum height of CVJ

阶段	最大跳跃高度/BH		主效应		交互效应
	FAI组( $n=14$ )	对照组( $n=14$ )	组别	次数	组别×次数
第1次	0.80±0.05	0.80±0.07	$P=0.872$	$P < 0.001^*$	$P=0.589$
第15次	0.78±0.03	0.78±0.06			
第30次	0.76±0.03	0.76±0.06			

CVJ落地时的运动学和动力学指标与健康人群无显著差异,这与本研究假设①不一致。并且,这一发现也不同于既往研究结果<sup>[26]</sup>。本文推测,FAI患者在经历多次扭伤后对运动模式的“再学习”或建立了一种与健康人群更为相近的运动策略<sup>[27]</sup>,使其在进行剧烈运动时避免因不当运动而出现二次关节损伤。

### 3.2 FAI患者CVJ落地的偏侧性分析

人体在进行在双侧肢体协同运动中,大脑负责协调双侧肢体的动作,但可能无法精确地分配双侧的负荷。这种不均衡的负荷分配可能导致一侧肢体承受较大的压力,从而随时间积累增加损伤风险<sup>[28]</sup>。本文通过对vGRF峰值的SI评估,揭示了运动过程中左右下肢在支撑动作对称性上的差异,尤其是着陆缓冲地面撞击过程中的表现<sup>[29]</sup>。本文观察到两组在vGRF峰值的偏侧性上存在差异,FAI患者的偏侧性明显高于健康人,这与本研究假设②一致。尽管本文未观察到FAI患者与健康人群在vGRF峰值上存在显著差异,但这并不意味着FAI患者在运动中没有采取特定的策略来适应其患侧踝关节的功能障碍。为了维持患侧正常的生物力学表现,并且同时维持动作表现的质量相对稳定,FAI患者可能通过预先调整机制,对即将到来的动作进行预判,并在执行CVJ时采取一种预先的“保护状态”来优化生物力学表现。这种策略可能涉及到对下肢关节位置的调整,以维持动作质量的稳定

性,并减少对患侧踝关节的潜在损伤风险<sup>[30]</sup>。此外,本文结果提示,FAI患者在CVJ落地过程中可能存在一种非对称的运动模式,这种模式可能与患侧踝关节功能障碍有关。这种非对称性可能是一种适应性行为,旨在通过调整下肢关节的运动模式来减少对患侧的过度负荷,但这是否是一种有意识的策略,还是长期运动实践中形成的无意识模式,目前尚不明确。这种适应性行为与既往研究中FAI患者倾向于通过其他下肢关节的协同作用来减轻患侧踝关节负担的发现相一致<sup>[2]</sup>。即FAI患者在运动中可能采取了一种更为复杂的下肢协调机制,以适应其功能障碍。

### 3.3 FAI患者CVJ落地过程中的生物力学特征分析

本研究进一步发现,在执行CVJ落地任务时,在两组运动学指标上观察到了次数的主效应,并且随着跳跃次数的增加,个体纵跳高度呈现逐渐下降的趋势,同时下肢动作模式也随之改变,这可能是由于疲劳积累导致的生物力学适应性调整<sup>[10]</sup>。然而,本文发现,尽管CVJ次数增加对所有受试者的下肢功能产生了一定影响,但FAI患者患侧下肢的生物力学表现或下肢SI与健康人群没有显著差异,这与本研究假设③相悖,但与部分现有研究结果一致。Steib等<sup>[31]</sup>研究认为,FAI患者在完成力竭性运动后,其姿态控制和本体感觉没有显著受损;Gribble等<sup>[32-33]</sup>研究发现,相比于健康人,FAI患者在经历具

有挑战性的活动并感到疲劳后,其动态平衡能力会有所下降,但仅在通过复杂运动引发疲劳后才会出现。在本研究中,尽管在进行 CVJ 任务期间,受试者的疲劳感和生物力学特征会有所变化<sup>[9]</sup>,但所采用的 CVJ 次数可能未能确保受试者达到足以引起显著生物力学变化的疲劳水平,这可能是 FAI 患者患侧下肢生物力学特征变化不明显的潜在原因。此外,不同的运动类型和涉及的肌肉对 FAI 患者的感觉-运动变化会产生影响<sup>[31]</sup>。CVJ 作为一种复合性运动任务,涉及多关节和肌群的协调工作,包括肌肉力量、神经控制和关节代偿等因素,这可能对运动执行产生重要影响<sup>[34]</sup>,从而掩盖了局部关节的控制缺陷。Dal Pupo 等<sup>[9]</sup>研究发现,人体为了应对对跳跃次数的增加以及随之而来的疲劳,会调整其内在的生物力学特征,例如在测试的后期,躯干-大腿的配合更为一致,这一现象可能掩盖了 FAI 患者因跳跃重复次数增加而出现的姿势控制缺陷。

### 3.4 局限性

本研究的局限性如下:① 选取 FAI 患者的 CAIT 评分均值为 20,踝关节不稳症状相对良好;② 未结合肌电进行分析讨论。未来研究应纳入评分更低的 FAI 患者,并结合肌电数据以提供更全面的生物力学分析。

## 4 结论

FAI 患者在执行 CVJ 落地任务时,患侧肢体与健康人群的运动学、动力学特征无明显差异,但在 vGRF 峰值 SI 上表现出更高的偏侧性。这一发现强调了在 FAI 患者的康复训练中应重视纠正下肢偏侧性,以减少潜在的长期损伤风险。此外,尽管随着跳落任务次数的增加和疲劳程度的上升,人体会调整下肢动作模式,但这种调整似乎并未对影响功能性踝关节不稳者患侧下肢的生物力学特性和下肢偏侧性产生明显影响。因此,在制定 FAI 患者的康复计划时,需尤其关注下肢偏侧性的纠正,并考虑在不同状态下的生物力学适应性,以实现更全面的康复效果。

本研究通过对比单侧 FAI 患者的患侧下肢和健康人群 CVJ 落地过程中的下肢生物力学特征及偏侧性的差异,为 FAI 患者的康复训练提供理论和实验参考依据。总体而言,对于训练者和教练员,

围绕 FAI 患者开展高强度、高次数的运动训练时,不仅需要密切关注患侧肢体运动特征的变化,还需要采取适当的措施减少两侧下肢偏侧性,减少损伤风险。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**王子龙负责文章设计、数据采集整理、论文撰写;张芷棋、孟令越、卢梦雅负责试验开展和论文修改;包佳威负责撰写代码;张秋霞和孔翎宇对论文进行写作指导和校正。

### 参考文献:

- [1] MEDINA MCKEON JM, HOCH MC. The ankle-joint complex: A kinesiological approach to lateral ankle sprains [J]. *J Athl Train*, 2019, 54(6): 589-602.
- [2] 王子龙, 孟昕, 张芷棋, 等. 功能性踝关节不稳男性下蹲跳过程中下肢的生物力学特征[J]. *中国组织工程研究*, 2025, 29(3): 478-485.
- [3] CAO S, WANG C, ZHANG G, et al. *In vivo* kinematics of functional ankle instability patients during the stance phase of walking [J]. *Gait Posture*, 2019(73): 262-268.
- [4] MA T, LI Q, SONG Y, et al. Chronic ankle instability is associated with proprioception deficits: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Sport Health Sci*, 2021, 10(2): 182-191.
- [5] 杨亦敏, 张泽毅, 刘卉, 等. 护踝对功能性踝关节不稳患者下肢运动生物力学特征的影响[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(4): 742-748.  
YANG YM, ZHANG ZY, LIU H, et al. Effects of ankle braces on lower extremity biomechanics of patients with functional ankle instability [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(4): 742-748.
- [6] 李世明, 刘学贞. 纵跳理论研究进展[J]. *北京体育大学学报*, 2004(1): 65-67.
- [7] DUTAILLIS B, DIAMOND LE, LAZARCZUK SL, et al. Vertical jump testing after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2024, 56(2): 181-192.
- [8] RANAVOROLO A, DON R, CACCHIO A, et al. Comparison between kinematic and kinetic methods for computing the vertical displacement of the center of mass during human hopping at different frequencies [J]. *J Appl Biomech*, 2008, 24(3): 271-279.
- [9] JULIANO DAL PUP O, JONATHAN ACHE DIAS, RODRIGO GHE DINI GH ELLER, et al. Stiffness, intralimb coordination, and joint modulation during a continuous vertical jump test [J]. *Sports Biomech*, 2013, 12(3): 259-271.

- [10] 陆阿明, 叶永延, 郑亦华, 等. 连续纵跳及其疲劳的生物力学研究[J]. 浙江体育科学, 1998(3): 3-6.
- [11] LIU Y, DONG S, WANG Q, *et al.* Deficits in proprioception and strength may contribute to the impaired postural stability among individuals with functional ankle instability [J]. *Front Physiol*, 2024(15): 1342636.
- [12] 毛晓锟, 张秋霞, 王国栋, 等. 优势侧和非优势侧跑步支撑期的生物力学侧偏性研究[J]. 首都体育学院学报, 2017, 29(1): 91-96.
- [13] CARPES FP, MOTA CB, FARIA IE. On the bilateral asymmetry during running and cycling—A review considering leg preference [J]. *Phys Ther Sport*, 2010, 11(4): 136-142.
- [14] 束洋, 梁志强, 马沐佳, 等. 我国速度滑冰国家队运动员下肢不对称性的生物力学分析[J]. 上海体育学院学报, 2023, 47(6): 67-75.
- [15] GRIBBLE PA, DELAHUNT E, BLEAKLEY C, *et al.* Selection criteria for patients with chronic ankle instability in controlled research: A position statement of the International Ankle Consortium [J]. *Br J Sports Med*, 2014, 48(13): 1014-1018.
- [16] WU HW, CHANG YS, AREFIN MS, *et al.* Six-week remodeled bike pedal training improves dynamic control of lateral shuffling in athletes with functional ankle instability [J]. *Sports Health*, 2022, 14(3): 348-357.
- [17] HILLER CE, REFSHAUGE KM, HERBERT RD, *et al.* Balance and recovery from a perturbation are impaired in people with functional ankle instability [J]. *Clin J Sport Med*, 2007, 17(4): 269-275.
- [18] WANG B, ZHANG X, ZHU F, *et al.* A randomized controlled trial comparing rehabilitation with isokinetic exercises and thera-band strength training in patients with functional ankle instability [J]. *PLoS One*, 2022, 17(12): e0278284.
- [19] 张帅攀, 朱清广, 程艳彬, 等. 易筋经功法干预膝关节炎患者步态生物力学的随机对照试验[J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(10): 5081-5086.
- [20] 姚英策, 赵建斌, 杨晓巍, 等. 肌肉电刺激联合肌力训练对髌股关节痛患者膝关节生物力学特征的影响[J]. 医用生物力学, 2024, 39(4): 677-684.
- YAO YC, ZHAO JB, YANG XW, *et al.* Effects of muscle electrical stimulation combined with muscle strength training on biomechanical characteristics of knee joint in patients with patellofemoral pain [J]. *J Med Biomech*, 2024, 39(4): 677-684.
- [21] KOTSIFAKI A, WHITELEY R, VAN ROSSOM S, *et al.* Single leg hop for distance symmetry masks lower limb biomechanics: Time to discuss hop distance as decision criterion for return to sport after ACL reconstruction? [J]. *Br J Sports Med*. 2022;56(5):249-256.
- [22] 万祥林, 李秋捷, 杨辰, 等. 5种不同计算纵跳高度方法的比较[J]. 北京体育大学学报, 2017, 40(11): 62-66+85.
- [23] ROBINSON RO, HERZOG W, NIGG BM. Use of force platform variables to quantify the effects of chiropractic manipulation on gait symmetry [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 1987, 10(4): 172-176.
- [24] 张桑, 傅维杰, 刘宇. 不同着地冲击模式的下肢生物力学研究[J]. 体育科学, 2016, 36(1): 59-66.
- [25] KHALILI SM, BARATI AH, OLIVEIRA R, *et al.* Effect of combined balance exercises and kinesio taping on balance, postural stability, and severity of ankle instability in female athletes with functional ankle instability [J]. *Life (Basel)*, 2022, 12(2): 178-178.
- [26] 张阳, 张秋霞. 功能性踝关节不稳者在着地过程中相关生物力学特征研究[J]. 天津体育学院学报, 2013, 28(4): 355-358.
- [27] 张泽毅, 刘卉, 张美珍, 等. FAI 和 Coper 患者踝关节扭伤相关动作中的下肢运动生物力学特征[J]. 中国体育科技, 2023, 59(8): 47-55.
- [28] 张英媛, 陆阿明. 优势侧和非优势侧踝关节在连续纵跳下落阶段中的表现[J]. 体育科学, 2013, 33(5): 68-73.
- [29] LIU L, JIA M, MA Y, *et al.* Biomechanics research on laterality effect between dominant and non-dominant during double roundhouse kick in the competitive taekwondo [J]. *Heliyon*, 2023, 9(10): e20843.
- [30] 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' [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(4): 1049-1059.
- [31] STEIB S, HENTSCHE C, WELSCH G, *et al.* Effects of fatiguing treadmill running on sensorimotor control in athletes with and without functional ankle instability [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(7): 790-795.
- [32] GRIBBLE PA, HERTEL J, DENEGAR CR, *et al.* The effects of fatigue and chronic ankle instability on dynamic postural control [J]. *J Athl Train*, 2004, 39(4): 321-329.
- [33] GRIBBLE PA, HERTEL J, DENEGAR CR. Chronic ankle instability and fatigue create proximal joint alterations during performance of the star excursion balance test [J]. *Int J Sports Med*, 2007, 28(3): 236-242.
- [34] 魏智丰, 王骏昇, 王子朴. 国外重复跳跃能力研究进展与展望[J]. 体育学刊, 2023, 30(3): 129-135.