

髌股关节疼痛患者下台阶动作的下肢生物力学特征

高原, 熊哲宇, 郑尉, 陈昊楠, 陈方雨晴

<https://doi.org/10.12307/2025.925>

投稿日期: 2024-10-09

采用日期: 2024-11-28

修回日期: 2025-02-19

在线日期: 2025-03-15

中图分类号:

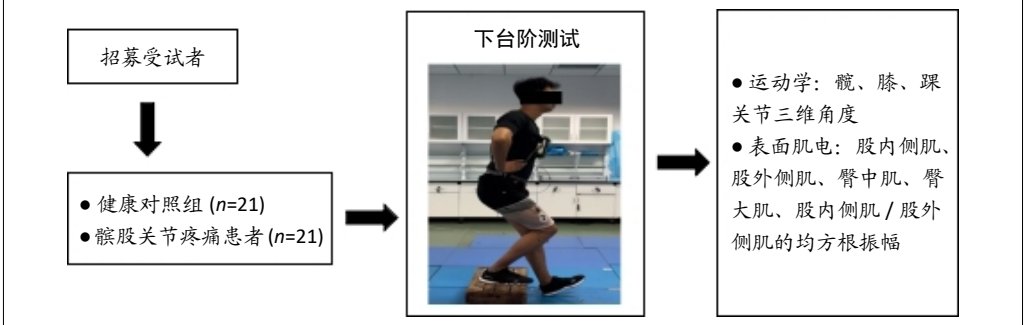
R459.9; R318; R873

文章编号:

2095-4344(2025)32-06913-07

文献标识码: B

文章快速阅读: 男性髌股关节疼痛患者下台阶测试的下肢生物力学特征



文题释义:

髌股关节疼痛: 是一种复杂的多因素疾病, 主要表现为在跑步、上下楼梯、跳跃等膝关节屈曲负荷的活动中出现髌周弥漫性疼痛。髌股关节疼痛多发于体力活动水平较高的人群中, 若未能进行及时有效的诊治, 日后可能发展成为髌股关节炎。

下台阶测试: 用于模拟临床环境中下楼梯的活动, 可以再现下楼梯过程中的膝关节运动特征, 不仅能够增加膝关节在屈曲角度下的负荷, 还能有针对性地测试肌肉主动收缩和协调配合能力。下台阶测试已被证明可以有效监测日常活动中的生物力学特征。

摘要

背景: 髌股关节疼痛的发病机制复杂, 不良的动作模式及错误的肌肉激活模式等被认为可能增高髌股关节应力而造成损伤, 但当前研究结果尚不统一。关于髌股关节疼痛患者下台阶动作的生物力学研究多集中于运动学特征, 有关表面肌电特征的研究较少。此外, 目前尚无研究分析髌股关节疼痛患者在执行下台阶动作过程中健侧和患侧生物力学表现相较于健康人的差异。

目的: 探究髌股关节疼痛患者双侧下肢下台阶过程中的运动学及表面肌电特征。

方法: 招募髌股关节疼痛男性与健康男性各21名, 两组受试者均进行下台阶测试。采用三维动态捕捉系统、测力台及表面肌电测试仪同步采集运动学、动力学及表面肌电数据。

结果与结论: ①运动学指标: 与健康对照组相比, 髌股关节疼痛组患侧与健侧均显示出较小的髌关节屈曲角度 ($P=0.005$, $P=0.011$)、较大的髌关节内收角度 ($P=0.033$, $P=0.039$)、较大的膝关节内翻角度 ($P=0.001$, $P=0.001$), 髌股关节疼痛组患侧表现出较大的髌关节内旋角度 ($P=0.013$)、较小的膝关节屈曲角度 ($P=0.043$)、较小的踝关节背屈角度 ($P=0.002$); 与健侧相比, 患侧表现出较小的踝关节背屈角度 ($P=0.002$);

②表面肌电指标: 与健康对照组相比, 髌股关节疼痛组患侧股内侧肌激活程度减小 ($P=0.002$)、臀中肌激活程度减小 ($P=0.015$)、股内侧肌/股外侧肌的激活比率下降 ($P=0.010$); 与健侧相比, 患侧臀中肌激活程度减小 ($P=0.008$); ③结果表明, 髌股关节疼痛患者在下台阶动作时存在异常的下肢生物力学特征, 主要表现为下肢关节在矢状面和额状面的运动学指标变化及股内侧肌和臀中肌的激活程度变化, 这些改变反映了髌股关节疼痛患者在下台阶过程中采用了僵硬的落地模式, 并显示出下肢其他关节代偿的现象。此外, 异常的下肢生物力学特征同时存在于髌股关节疼痛患者的健侧肢体中, 患者双侧下肢存在不对称。

关键词: 髌股关节疼痛; 下台阶; 运动学; 表面肌电; 生物力学; 下肢; 疼痛

Lower extremity biomechanical characterization during step-down test in patients with patellofemoral pain

Gao Yuan, Xiong Zheyu, Zheng Wei, Chen Haonan, Chen Fangyuqing

Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China

Gao Yuan, Master candidate, Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China

Corresponding author: Zheng Wei, Associate professor, Master's supervisor, Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China

Abstract

BACKGROUND: The pathogenesis of patellofemoral pain is complex, and poor movement patterns and incorrect muscle activation patterns have been suggested to increase patellofemoral joint stress and cause injury, but the results of current studies are not uniform. Current biomechanical studies of step-down test in patients with patellofemoral pain have focused on kinematic characteristics, and there is a lack of research on surface electromyographic characteristics. In addition, there are no studies that analyze the differences in biomechanical performance between the healthy and affected sides of

天津体育学院, 天津市 301617

第一作者: 高原, 女, 2000年生, 山东省德州市人, 汉族, 天津体育学院在读硕士, 主要从事运动损伤预防与康复的研究。

通讯作者: 郑尉, 副教授, 硕士生导师, 天津体育学院, 天津市 301617

<https://orcid.org/0000-0002-9744-2280> (郑尉)

基金资助: 天津市高等学校本科教学质量与教学改革研究计划项目 (B231007102), 项目负责人: 郑尉

引用本文: 高原, 熊哲宇, 郑尉, 陈昊楠, 陈方雨晴. 髌股关节疼痛患者下台阶动作的下肢生物力学特征 [J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(32):6913-6919.



patellofemoral pain patients compared with healthy subjects during the downward step test.

OBJECTIVE: To investigate the kinematic and surface electromyographic characteristics of patients with patellofemoral pain during bilateral lower extremity step-downs.

METHODS: Twenty-one men with patellofemoral pain and 21 healthy men were recruited, and both groups of subjects underwent a step-down test. Kinematic, kinetic and surface electromyographic data were synchronously collected using a three-dimensional dynamic capture system, a force platform and a surface electromyographic tester.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Kinematics: Compared with the healthy control group, the affected and healthy sides of the patellofemoral pain group showed a smaller hip flexion angle ($P=0.005$, $P=0.011$), a larger hip internal rotation angle ($P=0.033$, $P=0.039$), and a larger knee valgus angle ($P=0.001$, $P=0.001$), and the affected side of the patellofemoral pain group exhibited a larger hip internal rotation angle ($P=0.013$), a smaller knee flexion angle ($P=0.043$), and a smaller ankle dorsiflexion angle ($P=0.002$); and compared with the healthy side, the affected side exhibited a smaller ankle dorsiflexion angle ($P=0.002$). (2) Surface electromyography: Compared with the healthy control group, the patellofemoral pain group showed reduced activation of the vastus medialis oblique ($P=0.002$), reduced activation of the gluteus medius ($P=0.015$), and a decreased vastus medialis oblique / vastus lateralis ratio ($P=0.010$) on the affected side; and compared with the healthy side, there was a reduced activation of the gluteus medius on the affected side ($P=0.008$). (3) The results indicate that patients with patellofemoral pain have abnormal lower limb biomechanical characteristics during step-down test, which are mainly manifested as changes in kinematic and indexes of the lower limb joints in the sagittal and frontal planes as well as changes in activation levels of the medial femoral and gluteus medius muscles. These changes reflect the fact that patients with patellofemoral pain adopt a stiff landing pattern during step-downs and show pronation of other joints of the lower extremity. In addition, abnormal lower extremity biomechanical characteristics are also present in the healthy limbs of patients with patellofemoral pain, and bilateral lower extremity asymmetry exists in such patients.

Key words: patellofemoral joint pain; step-down; kinematics; surface electromyography; biomechanics; lower extremity; pain

Funding: Undergraduate Teaching Quality and Teaching Reform Research Program Project in Tianjin Higher Education Institutions, No. B231007102 (to ZW)

How to cite this article: GAO Y, XIONG ZY, ZHENG W, CHEN HN, CHEN FYQ. Lower extremity biomechanical characterization during step-down test in patients with patellofemoral pain. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2025;29(32):6913-6919.

0 引言 Introduction

髌股关节疼痛是一种常见的慢性肌肉骨骼疾病^[1]，主要表现为在下蹲、跑步、上下楼梯等活动中出现髌周弥漫性疼痛^[2]，多发生在青少年和体力活动水平较高的人群中。据报道，普通成年人髌股关节疼痛患病率约为22.7%^[3]，青少年患病率约为29%^[4]。针对军人的流行病学研究发现，髌股关节疼痛每年发病率高达62.2/100人^[5]。首次出现髌股关节疼痛症状后，57%的患者在5-8年后仍存在疼痛和功能障碍^[6]。在英国，每年需花费约213亿美元用于髌股关节疼痛的治疗。近年来越来越多的研究表明，若未进行及时有效的治疗，髌股关节疼痛可能发展为不可逆转的髌股关节炎^[7-8]，可见髌股关节疼痛的发生不仅会降低患者的体力活动水平和生活质量^[9]，更会造成大量医疗资源的损失，因此需要给予髌股关节疼痛更多的关注和研究。

髌股关节疼痛的发病机制复杂，普遍认为可能是下肢生物力学改变引起髌股关节所受异常负荷和应力升高所致^[10-11]。具体来说，不良的动作模式（如髌内收和内旋角度增大、膝屈曲角度减小）及错误的肌肉激活模式（如股内侧肌激活延迟）等^[12-16]，均被认为可能增高髌股关节应力而造成损伤，但当前研究结果尚未达成一致^[11]。目前针对髌股关节疼痛患者在跑步和跳跃等体育活动中的生物力学特征研究已经非常成熟^[17-19]，然而24%的髌股关节疼痛患者经常久坐不动^[20]，所以研究日常生活活动时的下肢运动模式尤为重要。下台阶测试已被证明可以有效监测日常活动中的生物力学特征^[21-22]，在临床环境中模拟下楼梯的活动，可以增加膝关节屈曲角度下的负荷，针对性地测试肌肉主动收缩和协调配合能力^[23]。HOGLUND等^[24]分析了髌股关节疼痛患者下台阶时的运动学特征，发现与健康对照组相比，髌股关节疼痛患者髌关节内收、

内旋角度增加，膝关节内收角度减小。MORITA等^[25]发现髌股关节疼痛患者下台阶时躯干与膝关节矢状面运动学改变。然而PIVA等^[26]研究发现在下台阶时，髌股关节疼痛患者和无痛对照组的髌关节内收和髌关节内旋角度没有差异。目前关于下台阶动作的生物力学研究多集中于运动学特征，表面肌电特征的研究较少。此外，目前尚无研究分析髌股关节疼痛患者在执行下台阶动作过程中，健侧和患侧生物力学表现相较于健康人的差异。髌股关节疼痛患者健侧与患侧下肢由于疼痛、关节组织结构和肌肉力量等因素的影响，可能在动作模式上存在一定差异，这些差异可能会导致下肢代偿性产生不对称的生物力学特征，从而进一步加重损伤^[27]。该研究通过采集髌股关节疼痛患者和健康人群在下台阶过程中下肢运动学及表面肌电数据，对比髌股关节疼痛患者与健康人群的差异以及髌股关节疼痛患者健侧与患侧的差异，最终确定髌股关节疼痛患者下台阶动作的下肢生物力学特征，为有效预防和治疗髌股关节疼痛提供理论支持和方法依据。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 横断面调查，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。

1.2 时间及地点 试验于2024年3-7月在天津体育学院运动生物力学实验室完成。

1.3 对象 参照以往研究^[24]，采用G-Power 3.1.9.7软件，将效应量、显著性水平、检验效能分别设定为0.5, 0.05, 0.8，计算得出最小样本量为35人，考虑20%流失率，计算总样本量为42人。参考《国际功能、残疾和健康分类·髌股关节疼痛》临床实践指南的筛查标准^[28]，由1名有经验的执证康复治疗师完成受试者筛查。

诊断标准: ①在进行跑步、下蹲、上下楼梯、跳跃

等动作时出现髌后或髌周疼痛；②疼痛至少持续 3 个月以上；③最近 1 周内疼痛最严重时目测类比评分 ≥ 3 分；④经问诊与骨科特殊检查，排除其他可能导致膝前痛的疾病（与膝关节半月板、韧带损伤，髌骨脱位或半脱位，髌腱炎，髌下脂肪垫炎，胫骨转子炎鉴别诊断）。

纳入标准：①符合髌股关节疼痛的诊断标准，且患者为单侧疼痛；②年龄 18–25 岁；③体质量指数在 18.5–23.9 kg/m² 范围内。

排除标准：①踝关节扭伤急性期和严重足踝部畸形，如马蹄足、重度拇外翻等；②膝关节或下肢其他关节有手术史或创伤史；③膝关节有严重积液，浮髌试验阳性。

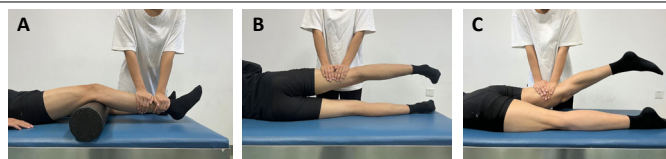
此研究在天津体育学院招募单侧髌股关节疼痛男性 21 名，根据髌股关节疼痛组受试者的年龄、身高等匹配 21 名健康男性作为健康对照组。全部受试者已知晓试验全部内容，并已签署知情同意书。此次试验已获得天津体育学院伦理委员会同意并批准（伦理号：TJUS2024-001）。

1.4 试验方法

1.4.1 试验前准备 采用 8 台红外摄像头的三维动态捕捉系统 (Qualisys Track Manager, 瑞典, 采样频率 100 Hz)、三维测力台 (Kistler 9281CA, 瑞士, 采样频率 1 000 Hz) 与表面肌电测试仪 (Noraxon, 美国, 采样频率 1 500 Hz) 同步采集受试者的下肢运动学、动力学与表面肌电数据。台阶为高 18 cm 的木制台阶^[29], 将台阶放置于测力台后方。每位受试者需穿统一提供的短裤与运动鞋。受试者充分热身之后进行测试动作练习, 待受试者熟悉掌握动作要领后开始正式测试。髌股关节疼痛组测试侧为患侧下肢, 健康对照组的测试侧为优势侧下肢, 优势侧判定采用单腿纵跳测试方法^[30]。首先对测试肢体臀大肌、臀中肌、股内侧肌、股外侧肌的表面皮肤进行脱毛处理和乙醇擦拭, 待皮肤干燥后, 将电极粘贴在相应肌肉的肌腹处。电极片粘贴完成后, 对目标肌群进行最大自主等长收缩测试, 见图 1, 每个动作持续发力保持 5 s。根据体表解剖学标志粘贴下肢共 26 个直径为 10 mm 的 Marker 点, 见图 2。

1.4.2 下台阶测试 受试者双脚支撑站在台阶上, 躯干挺直, 双手放在腰上, 通过用非测试侧的足部接触测力台而不将体质量转移到该肢体来模拟下台阶运动。测试侧下肢屈曲, 对侧肢体脚后跟触测力台后立即返回初始位置, 测试侧回到膝关节完全伸展状态, 即为一次完整的测试^[23, 25, 31], 见图 3。测试过程中同步采集受试者运动学、动力学及表面肌电数据, 若受试者在运动过程中失去平衡、动作不符合规范或者 Marker 点掉落, 测试数据将被忽略, 每位受试者需采集 3 次成功数据。

1.4.3 试验数据处理 使用 Qualisys Track Manager 软件对原始运动学数据与力台数据进行修点, 截取所需部分的模型导入 Visual3D 软件 (C-Motion, Inc) 进行运动学数据分析。



图注：图 A 为股内侧肌与股外侧肌；B 为臀中肌；C 为臀大肌。

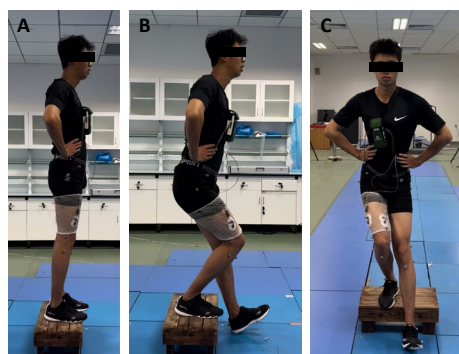
图 1 | 最大自主等长收缩测试动作

Figure 1 | Maximum voluntary contraction testing action



图 2 | 下肢 Marker 点粘贴位置

Figure 2 | Lower extremity Marker point paste location



图注：图 A 为起始动作；B 为下台阶动作侧面观；C 为下台阶动作正面观。

图 3 | 下台阶动作

Figure 3 | Step-down test

采用低通巴特沃斯数字滤波器 (6 Hz) 对运动学数据进行滤波^[32]。初始触地时刻定义为地面垂直反作用力首次大于或等于 10 N 的第一时刻^[33]。截取受试者在最大自主等长收缩时中间 3 s 以及下台阶时初始触地时刻前后 100 ms 的原始肌电数据。采用表面肌电信号处理软件 (MR-XP 1.07 Master Edition) 对原始肌电数据进行滤波 (35–500 Hz)、整流、平滑过滤处理^[32]。计算均方根振幅并使用各自最大自主等长收缩力量进行标准化。

1.5 主要观察指标 ①运动学指标：初始触地时刻髌关节、膝关节和踝关节在矢状面、额状面和水平面的角度值（屈/伸角、内/外翻角、内/外旋角）；②表面肌电指标：初始触地时刻的股内侧肌、股外侧肌、臀中肌、臀大肌的均方根振幅及股内侧肌/股外侧肌的激活比率。

1.6 统计学分析 采用 SPSS 26.0 进行统计学分析, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 对各变量进行描述。对受试者基本资料采用独立样本 *t* 检验进行比较。使用 Shapiro-Wilk 检验对所有数据进行正态检验, 若数据符合正态分布, 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; 若数据不符合正态分布, 组内比较采用 Wilcoxon 符号秩和检验, 组间比较采用 Mann-Whitney *U* 秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有

显著性意义。该文的统计学方法已经由天津体育学院统计学专家审核。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 测试过程共纳入 42 名受试者，髌股关节疼痛组与健康对照组各 21 名，无人员脱落，全部进入结果分析。

2.2 两组受试者基本资料比较 两组受试者的年龄、身高、体质量、体质量指数均无显著性差异 ($P > 0.05$)，见表 1，具有可比性。

表 1 | 两组受试者基本情况 (n=21)

基本信息	髌股关节疼痛组	健康对照组	P 值
年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	22.62±2.06	22.88±1.93	0.718
身高 ($\bar{x} \pm s$, cm)	180.85±5.24	179.76±4.66	0.555
体质量 ($\bar{x} \pm s$, kg)	73.00±4.53	71.35±5.24	0.374
体质量指数 ($\bar{x} \pm s$, kg/m ²)	22.33±1.18	22.07±1.48	0.612
患侧 (左侧/右侧, n)	9/12		

2.3 试验流程图 见图 4。

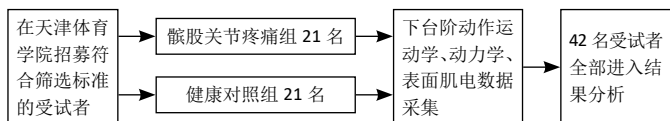


图 4 | 试验流程图
Figure 4 | Trial flow chart

2.4 下台阶动作中运动学指标比较 下台阶动作中，与健康对照组相比，髌股关节疼痛组患侧与健侧均显示出较小的髌关节屈曲角度 ($P=0.005$, $P=0.011$)、较大的髌关节内收角度 ($P=0.033$, $P=0.039$)、较大的膝关节内翻角度 ($P=0.001$, $P=0.001$)，髌股关节疼痛组患侧表现出较大的髌关节内旋角度 ($P=0.013$)、较小的膝关节屈曲角度 ($P=0.043$)、较小的踝关节背屈角度 ($P=0.002$)；与髌股关节疼痛组健侧相比，患侧表现出较小的踝关节背屈角度 ($P=0.002$)。见表 2。

表 2 | 两组受试者下台阶动作中下肢关节三维角度值比较 ($\bar{x} \pm s$, n=21, °)

部位		髌股关节疼痛组		健康对照组
		患侧	健侧	
髌	屈曲 (+)/ 伸展 (-)	44.46±7.77 ^b	44.42±7.26 ^b	53.41±7.48
	内收 (+)/ 外展 (-)	16.17±4.02 ^b	16.87±5.03 ^b	12.14±4.91
	内旋 (+)/ 外旋 (-)	6.41±1.78 ^b	5.01±2.29	4.47±1.20
膝	屈曲 (+)/ 伸展 (-)	69.12±6.00 ^b	72.50±7.16	73.46±4.58
	内翻 (+)/ 外翻 (-)	6.24±1.47 ^b	6.48±1.60 ^b	3.07±0.66
	内旋 (+)/ 外旋 (-)	-3.68±2.77	-3.96±2.02	-3.02±2.16
踝	背屈 (+)/ 跖屈 (-)	32.91±2.44 ^{ab}	36.95±1.66	37.32±3.05
	内翻 (+)/ 外翻 (-)	-1.90±2.46	-2.91±4.33	-2.73±2.97
	内旋 (+)/ 外旋 (-)	-5.80±1.78	-5.26±2.29	-5.05±2.37

表注：与髌股关节疼痛组健侧相比，^a $P < 0.05$ ；与健康对照组相比，^b $P < 0.05$ 。

2.5 下台阶动作中肌肉激活程度比较 下台阶动作中，与健康对照组相比，髌股关节疼痛组患侧股内侧肌激活程度减小 ($P=0.002$)、臀中肌激活程度减小 ($P=0.015$)、股内侧面肌 / 股外侧肌的激活比率下降 ($P=0.010$)；与髌股关节疼痛组健侧相比，患侧臀中肌激活程度减小 ($P=0.008$)。见表 3。

表 3 | 两组受试者下台阶动作时下肢肌肉激活程度比较 ($\bar{x} \pm s$, n=21)

肌肉	髌股关节疼痛组		健康对照组
	患侧	健侧	
股内侧面肌	0.78±0.07 ^b	1.01±0.14	1.18±0.09
股外侧肌	1.25±0.10	1.26±0.13	1.32±0.08
臀中肌	0.20±0.05 ^{ab}	0.31±0.51	0.41±0.07
臀大肌	0.21±0.10	0.24±0.10	0.22±0.07
股内侧面肌 / 股外侧肌	0.59±0.03 ^b	0.80±0.04	0.90±0.08

表注：与髌股关节疼痛组健侧相比，^a $P < 0.05$ ；与健康对照组相比，^b $P < 0.05$ 。

2.6 不良事件 测试期间 42 名受试者均未发生不良事件。

3 讨论 Discussion

髌股关节疼痛病因复杂，主要有近端、远端和局部因素^[11, 34-35]。近端因素主要集中在髌关节、骨盆和躯干，局部因素主要包括膝关节和周围组织，远端因素主要包括足、踝关节。目前髌股关节疼痛患者在不同功能性活动中的生物力学特征仍存在争议，这可能是治愈率低的主要原因。此次研究旨在探讨髌股关节疼痛患者下台阶动作时的下肢运动学、动力学及表面肌电特征。

3.1 运动学指标分析 膝关节运动学异常可能是造成髌股关节疼痛的最直接原因^[36]。DE OLIVEIRA SILVA 等^[37]发现上楼梯时髌股关节疼痛患者膝关节屈曲角度降低。MORITA 等^[25]的研究显示，髌股关节疼痛患者在单腿下蹲和下台阶动作时，膝关节屈曲角度均减小。此次研究结果与过往研究结果一致，与健康对照组相比，髌股关节疼痛患者膝关节屈曲角度减小。膝关节屈曲角度减小可能是由于疼痛造成的代偿措施，这种代偿措施的主要目的是减小髌股关节的负荷^[38]。疼痛可能会影响肌肉激活和抑制的重新分配，这种改变有助于调整运动模式，预防损伤的进一步发展。研究显示，减少膝关节屈曲角度可以增加股四头肌肌腱与髌腱在矢状面的夹角，从而降低髌股关节的矢状面应力，有助于减轻疼痛^[39]。矢状面运动受限的髌股关节疼痛患者可采用在额状面和水平面被动约束的策略来控制身体重心的减速。在该研究中，髌股关节疼痛组患者健侧与患侧均出现膝关节内翻角度增大，膝关节在额状面运动角度的增加，会加大髌股关节应力的侧向分量，从而导致髌股关节负荷增大产生髌股关节疼痛。有学者指出髌股关节疼痛有可能是膝骨关节炎一项不可忽视的致



病因素,许多膝骨关节炎患者在动态活动中会出现下肢生物力学的异常,通常以膝关节内翻和外翻角度异常为特征,其中膝关节过度内翻会导致膝关节内侧负荷增大,BROUWER等^[40]的研究进一步指出,当膝关节内翻角度出现异常时,膝骨关节炎的发生率约是正常人群的2倍。该研究还发现髌股关节疼痛患者在下台阶动作时表现出更大的膝关节外旋,虽然与健康对照组相比没有显著性差异,但仍可以说明髌股关节损伤机制。体外实验结果也表明,负重状态下膝关节外旋会增加髌骨后的压力^[41]。因此,三维关节旋转增大髌股关节的应力,可能是加重髌股关节疼痛的发病机制。

髌、膝、踝关节作为下肢完整的运动链的组成部分,动态任务中异常的膝关节运动会影响髌关节、踝关节的生物力学。此次研究假设髌股关节疼痛患者会通过较大的髌关节屈曲角度代偿较小的膝关节屈曲角度,从而改变僵硬的运动模式来完成下台阶动作,然而研究结果发现,与健康对照组相比,髌股关节疼痛组患者健侧与患侧髌关节屈曲角度均减小。正常情况下,在膝关节屈曲角度与踝关节背屈角度基本相同的情况下,髌关节屈曲角度越大,作用在髌股关节上的力会越小。但POWERS等^[42]的研究发现,髌股关节疼痛患者在进行负重活动时髌关节屈曲角度减小,骨盆前倾和躯干伸展角度增加,身体重心后移,这种运动模式与髌部以及躯干的伸肌抑制有关。分析研究结果,可能为髌股关节疼痛患者下台阶动作落地时来自地面的冲击在髌关节处并没有得到缓冲,而是直接冲击到躯干,导致骨盆与躯干代偿性运动。此外,根据POLLARD等^[43]关于落地模式和膝关节额状面角度的研究,膝关节和髌关节屈曲角度不足时会通过增加膝关节外翻来缓冲掉来自地面的冲击,所以当髌关节屈曲角度不足时,膝关节额状面负荷增大,这也与此次研究结果一致。该研究观察到与健康对照组相比,髌股关节疼痛患者髌关节内收与内旋角度增加。WILLSON等^[44]发现髌股关节疼痛患者在单腿下蹲过程中表现出更大的膝关节外旋和髌关节内收。HOGLUND等^[24]的研究对比了髌股关节疼痛患者与健康人群在单腿下蹲与下台阶动作时的下肢关节角度,发现髌股关节疼痛患者在两项任务中均出现髌关节内收及内旋角度增加、踝关节背屈及外旋角度增加。MCKENZIE等^[45]也观察到在下台阶时,髌股关节疼痛患者的髌关节内收和内旋角度显著高于健康受试者。髌内收角度的增大可能导致髌骨相对髌前上棘向内移动,从而增大动态Q角。研究发现当Q角增加10°,髌股关节应力会相应增加约45%^[46]。杨辰等^[47]的研究同样表明,较大的髌内收角度与髌股关节疼痛的发生有关,但这一现象在女性中相较于男性更加显著。

与健康对照组及髌股关节疼痛组健侧相比,髌股关

节疼痛组患侧踝关节背屈角度减小。踝关节背屈受限可能需要其他关节进行补偿,踝关节背屈角度降低会限制胫骨在距骨上方的向前运动,导致代偿性距下关节旋前^[48],距下关节旋前时胫骨也会出现一定程度的内旋。为了维护螺旋归位机制,股骨则需要相对于胫骨出现内旋内收,导致动态膝外翻出现^[49],引起髌骨软骨局部压力过大。EMAMVIRDI等^[50]的研究发现,髌股关节疼痛组患侧踝关节背屈角度与健康对照组相比下降6°,与髌股关节疼痛组健侧相比下降4°,这与此次研究结果一致,表明髌股关节疼痛患者可能存在下肢不对称。WAITEMAN等^[51]的研究对比了髌股关节疼痛患者在下台阶和单腿跳测试中的运动表现,与健康对照组相比,髌股关节疼痛患者双侧肢体均出现运动表现下降。肢体间不对称会潜在影响动作模式及运动表现,一旦出现优势侧代偿,力量的不对称可能更加明显,这不利于损伤的恢复,有研究表明当肢体间不对称超过15%时会增加运动损伤风险^[52]。此外,肢体间不对称与损伤发展是否存在因果关系还需进一步的前瞻性研究。

3.2 表面肌电指标分析 该研究分析了髌股关节疼痛患者和健康受试者在下台阶动作时髌关节与膝关节周围肌肉的激活情况,结果显示下台阶时髌股关节疼痛组患侧股内侧肌激活程度减小、股内侧肌/股外侧肌的激活比率降低,臀中肌激活程度减小,这表明髌股关节疼痛患者存在神经肌肉控制障碍,相关肌肉激活水平低,运动时不利于保持正确的下肢力线。髌骨运动轨迹异常和肌肉失衡被认为是导致髌股关节应力增加的主要原因。股内侧肌作为唯一控制髌骨过度外侧移位的肌肉,当股内侧肌力量不足或激活受抑制时,会导致髌骨向外倾斜,减少髌股关节的接触面积,使髌股关节应力增大^[53-54],从而造成髌股关节疼痛。GLAVIANO等^[15]的研究显示与健康受试者相比,髌股关节疼痛女性在进行单腿下蹲、下台阶及弓步动作时,股内侧肌激活程度减小。CHEN等^[55]的研究发现在进行规定任务时,髌股关节疼痛患者的股内侧肌/股外侧肌的激活比率降低,这也表明股内侧肌的激活水平下降。分析股内侧肌及股外侧肌激活均下降的原因,可能与抑制性神经机制有关,在下台阶过程中髌股关节疼痛患者无法在股四头肌发力时募集到足够多的运动神经元^[56]。

越来越多的研究表明,髌关节肌肉功能异常可以影响髌股关节的生物力学^[42]。臀中肌作为深层稳定肌,可以维持骨盆以及股骨头的稳定,臀大肌则提供了可以抵抗髌关节屈曲、内收和内旋运动的三维稳定性。除此之外,臀肌还是髌关节外展、外旋的主要动力来源^[57]。当髌关节外展和外旋力量不足时,可能引起股骨出现过度内收和内旋等,这种错误的动作模式会导致髌骨的过度外移和外倾,进而增加髌股关节软骨磨损的风险。此次研究结

果显示,在下台阶动作过程中髌股关节疼痛患者臀中肌激活程度降低,而臀大肌则没有显著性变化,这与前人研究结果一致。MIRZAI E 等^[16]研究发现,与健康受试者相比,髌股关节疼痛男性在进行单腿站立和单腿深蹲时臀中肌激活水平显著降低,而臀大肌则没有显著性变化。WILSON 等^[58]也发现与健康受试者相比,髌股关节疼痛患者在跑步过程中表现出臀中肌激活延迟和激活程度降低,而两组之间臀大肌激活的幅度和时间没有差异。与髌股关节疼痛组健侧相比,髌股关节疼痛组患侧臀中肌激活程度降低,这说明髌股关节疼痛患者双侧肌肉激活并不平衡,神经肌肉控制是影响动作对称性的重要因素。此外 PAYNE 等^[59]的研究发现,髌股关节疼痛患者臀中肌激活不对称与膝关节疼痛相关。总体来说,髌股关节疼痛患者的股内侧肌、股外侧肌与臀中肌的激活程度降低,膝关节异常传入感觉信息可能会降低 α 运动神经元的兴奋性^[60],导致肌肉激活受到抑制。臀中肌作为控制股骨内收内旋的肌肉,激活程度下降,导致髌股关节疼痛组健侧与患侧髌关节内收内旋角度均大于健康对照组,这与前文中运动学特征一致。

3.3 研究局限性 首先,股内侧肌与股外侧肌肌力失衡以及股内侧肌激活延迟可能是导致髌骨运动轨迹异常的主要原因,该研究仅分析了股内侧肌与股外侧肌的肌肉激活特征,并未分析两者的激活时间差;其次,并没有对测试当天受试者的膝痛水平进行评估,疼痛水平可能会适应性改变下肢生物力学特征。

3.4 结论 与健康对照组相比,髌股关节疼痛患者在下台阶动作时存在异常的下肢生物力学特征,主要表现为下肢关节在矢状面和额状面的运动学指标变化及股内侧肌和臀中肌的激活程度变化。这些改变反映了髌股关节疼痛患者在下台阶过程中采用了僵硬的落地模式,并显示出下肢其他关节代偿的现象。针对髌股关节疼痛患者的训练,除强化股四头肌力量外,还应对髌关节相关肌群进行强化练习,以提高髌关节以及股骨的稳定性;加强踝关节的稳定性训练,以减少远端关节功能异常对近端关节的不良影响。此外,髌股关节疼痛患者异常的下肢生物力学特征同时存在于髌股关节疼痛患者健侧肢体中,患者双侧下肢存在不对称。临床上对于髌股关节疼痛患者的干预治疗除针对患侧下肢外,还应注重对双侧下肢整体肌肉力量和动作模式的改善。

作者贡献: 高原、熊哲宇及通讯作者郑尉进行实验设计;高原进行实验数据的采集、处理与分析,并完成论文撰写及文章校对;熊哲宇、陈昊楠、陈方雨晴协助完成实验;通讯作者郑尉进行写作指导与文章校对。

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: 该文章撰写遵守《观察性临床研究报告指南》(STROBE 指南)。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稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] XU J, CAI Z, CHEN M, et al. Global research trends and hotspots in patellofemoral pain syndrome from 2000 to 2023: a bibliometric and visualization study. *Front Med (Lausanne)*. 2024;11:1370258.
- [2] GLAVIANO NR, BAZETT-JONES DM, BOLING MC. Pain severity during functional activities in individuals with patellofemoral pain: A systematic review with meta-analysis. *J Sci Med Sport*. 2022;25(5):399-406.
- [3] HOTT A, BROX JI, PRIPP AH, et al. Predictors of pain, function, and change in patellofemoral pain. *Am J Sports Med*. 2020;48(2):351-358.
- [4] THOMAS MJ, WOOD L, SELFE J, et al. Anterior knee pain in younger adults as a precursor to subsequent patellofemoral osteoarthritis: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord*. 2010;11:201.
- [5] ROCHA EAB, COSTA DE ASSIS SJ, MAIA DFM, et al. Risk factors for patellofemoral pain in the military: systematic review with meta-analysis. *J Athl Train*. 2024. doi: 10.4085/1062-6050-0526.23.
- [6] KAYLL SA, HINMAN RS, BRYANT AL, et al. Do biomechanical foot-based interventions reduce patellofemoral joint loads in adults with and without patellofemoral pain or osteoarthritis? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2023;57(13):872-881.
- [7] CROSSLEY KM, VAN MIDDELKOOP M, BARTON CJ, et al. Rethinking patellofemoral pain: Prevention, management and long-term consequences. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2019;33(1):48-65.
- [8] CULVENOR AG, VAN MIDDELKOOP M, MACRI EM, et al. Is patellofemoral pain preventable? A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Br J Sports Med*. 2021;55(7):378-384.
- [9] KIM S, WU Y, GLAVIANO NR, et al. Physical activity levels in persons with patellofemoral pain: a systematic review and meta-analysis. *Sports Health*. 2024. doi: 10.1177/19417381241264494.
- [10] LANKHORST NE, BIERMA-ZEINSTRAS SM, VAN MIDDELKOOP M. Factors associated with patellofemoral pain syndrome: a systematic review. *Br J Sports Med*. 2013;47(4):193-206.
- [11] POWERS CM, WITVROUW E, DAVIS IS, et al. Evidence-based framework for a pathomechanical model of patellofemoral pain: 2017 patellofemoral pain consensus statement from the 4th International Patellofemoral Pain Research Retreat, Manchester, UK: part 3. *Br J Sports Med*. 2017;51(24):1713-1723.
- [12] CELIK D, ARGUT SK, TÜRKER N, et al. The effectiveness of superimposed neuromuscular electrical stimulation combined with strengthening exercises on patellofemoral pain: A randomized controlled pilot trial. *J Back Musculoskelet Rehabil*. 2020;33(4):693-699.
- [13] FERREIRA AS, DE OLIVEIRA SILVA D, BARTON CJ, et al. Impaired isometric, concentric, and eccentric rate of torque development at the hip and knee in patellofemoral pain. *J Strength Cond Res*. 2021;35(9):2492-2497.
- [14] FAN C, NIU Y, WANG F. Local torsion of distal femur is a risk factor for patellar dislocation. *J Orthop Surg Res*. 2023;18(1):163.
- [15] GLAVIANO NR, SALIBA S. Differences in gluteal and quadriceps muscle activation during weight-bearing exercises between female subjects with and without patellofemoral pain. *J Strength Cond Res*. 2022;36(1):55-62.
- [16] MIRZAI E GH, RAHIMI A, KAJBAFVALA M, et al. Electromyographic activity of the hip and knee muscles during functional tasks in males with and without patellofemoral pain. *J Bodyw Mov Ther*. 2019;23(1):54-58.
- [17] FOX A, FERBER R, SAUNDERS N, et al. Gait kinematics in individuals with acute and chronic patellofemoral pain. *Med Sci Sports Exerc*. 2018;50(3):502-509.

- [18] HO KY, BARRETT T, CLARK Z, et al. Comparisons of trunk and knee mechanics during various speeds of treadmill running between runners with and without patellofemoral pain: a preliminary study. *J Phys Ther Sci*. 2021;33(10):737-741.
- [19] DE BLEECKER C, VERMEULEN S, DE BLAISER C, et al. Relationship between jump-landing kinematics and lower extremity overuse injuries in physically active populations: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2020;50(8):1515-1532.
- [20] RHODE C, LOUW QA, LEIBBRANDT DC, et al. Joint position sense in individuals with anterior knee pain. *S Afr J Physiother*. 2021;77(1):1497.
- [21] CROSSLEY KM, ZHANG WJ, SCHACHE AG, et al. Performance on the single-leg squat task indicates hip abductor muscle function. *Am J Sports Med*. 2011;39(4):866-873.
- [22] ALMEIDA GP, SILVA AP, FRANÇA FJ, et al. Relationship between frontal plane projection angle of the knee and hip and trunk strength in women with and without patellofemoral pain. *J Back Musculoskeletal Rehabil*. 2016;29(2):259-266.
- [23] PRIORE LB, AZEVEDO FM, PAZZINATTO MF, et al. Influence of kinesophobia and pain catastrophism on objective function in women with patellofemoral pain. *Phys Ther Sport*. 2019;35:116-121.
- [24] HOGELUND LT, HULCHER TA, AMABILE AH. Males with patellofemoral pain have altered movements during step-down and single-leg squatting tasks compared to asymptomatic males: A cross-sectional study. *Health Sci Rep*. 2024;7(6):e2193.
- [25] MORITA ÂK, TAVELLA NAVEGA M. Women with patellofemoral pain show changes in trunk and lower limb sagittal movements during single-leg squat and step-down tasks. *Physiother Theory Pract*. 2024;40(9):1933-1941.
- [26] PIVA SR, GOODNITE EA, CHILDS JD. Strength around the hip and flexibility of soft tissues in individuals with and without patellofemoral pain syndrome. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2005;35(12):793-801.
- [27] KIM S, PARK J. Patients with chronic unilateral anterior knee pain experience bilateral deficits in quadriceps function and lower quarter flexibility: a cross-sectional study. *Physiother Theory Pract*. 2022;38(13):2531-2543.
- [28] 王芎斌, 刘燕平, 苏娟, 等. 《国际功能、残疾和健康分类·髌股关节疼痛》临床实践指南(二)[J]. *康复学报*, 2021;31(3):177-199.
- [29] SILVA DDE O, BRIANI RV, PAZZINATTO MF, et al. Q-angle static or dynamic measurements, which is the best choice for patellofemoral pain? *Clin Biomech (Bristol)*. 2015;30(10):1083-1087.
- [30] IMPELLIZZERI FM, RAMPININI E, MAFFIULETTI N, et al. A vertical jump force test for assessing bilateral strength asymmetry in athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(11):2044-2050.
- [31] NAKAGAWA TH, MORIYA ÉT, MACIEL CD, et al. Frontal plane biomechanics in males and females with and without patellofemoral pain. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44(9):1747-1755.
- [32] NAKAGAWA TH, MORIYA ET, MACIEL CD, et al. Trunk, pelvis, hip, and knee kinematics, hip strength, and gluteal muscle activation during a single-leg squat in males and females with and without patellofemoral pain syndrome. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2012;42(6):491-501.
- [33] AMINAKA N, PIETROSIMONE BG, ARMSTRONG CW, et al. Patellofemoral pain syndrome alters neuromuscular control and kinetics during stair ambulation. *J Electromyogr Kinesiol*. 2011;21(4):645-651.
- [34] WALLIS JA, RODDY L, BOTTRELL J, et al. A systematic review of clinical practice guidelines for physical therapist management of patellofemoral pain. *Phys Ther*. 2021;101(3):pzab021.
- [35] COLLINS NJ, BARTON CJ, VAN MIDDELKOOP M, et al. 2018 Consensus statement on exercise therapy and physical interventions (orthoses, taping and manual therapy) to treat patellofemoral pain: recommendations from the 5th International Patellofemoral Pain Research Retreat, Gold Coast, Australia, 2017. *Br J Sports Med*. 2018;52(18):1170-1178.
- [36] GAITONDE DY, ERICKSEN A, ROBBINS RC. patellofemoral pain syndrome. *Am Fam Physician*. 2019;99(2):88-94.
- [37] DE OLIVEIRA SILVA D, BARTON CJ, PAZZINATTO MF, et al. Proximal mechanics during stair ascent are more discriminate of females with patellofemoral pain than distal mechanics. *Clin Biomech (Bristol)*. 2016;35:56-61.
- [38] 杨辰, 万祥林, 冯茹, 等. 膝痛对髌股关节痛业余跑者跑步和落地起跳缓冲期膝关节生物力学特征的影响[J]. *中国体育科技*, 2022,58(2):62-68.
- [39] SHERMAN SL, PLACKIS AC, NUELLE CW. Patellofemoral anatomy and biomechanics. *Clin Sports Med*. 2014;33(3):389-401.
- [40] BROUWER GM, VAN TOL AW, BERGINK AP, et al. Association between valgus and varus alignment and the development and progression of radiographic osteoarthritis of the knee. *Arthritis Rheum*. 2007;56(4):1204-1211.
- [41] LEE TQ, MORRIS G, CSINTALAN RP. The influence of tibial and femoral rotation on patellofemoral contact area and pressure. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2003;33(11):686-693.
- [42] POWERS CM. The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2010;40(2):42-51.
- [43] POLLARD CD, SIGWARD SM, POWERS CM. Limited hip and knee flexion during landing is associated with increased frontal plane knee motion and moments. *Clin Biomech (Bristol)*. 2010;25(2):142-146.
- [44] WILLSON JD, DAVIS IS. Utility of the frontal plane projection angle in females with patellofemoral pain. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2008;38(10):606-615.
- [45] MCKENZIE K, GALEA V, WESSEL J, et al. Lower extremity kinematics of females with patellofemoral pain syndrome while stair stepping. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2010;40(10):625-632.
- [46] HUBERTI HH, HAYES WC. Patellofemoral contact pressures. The influence of q-angle and tendofemoral contact. *J Bone Joint Surg Am*. 1984;66(5):715-724.
- [47] 杨辰, 曲峰, 刘卉, 等. 髌股关节痛业余跑者性别特异的下肢生物力学特征[J]. *医用生物力学*, 2020,35(6):672-678.
- [48] MACRUM E, BELL DR, BOLING M, et al. Effect of limiting ankle-dorsiflexion range of motion on lower extremity kinematics and muscle-activation patterns during a squat. *J Sport Rehabil*. 2012;21(2):144-150.
- [49] 董友清, 魏子轩, 吴海鸥, 等. 不同类型女性髌股关节疼痛综合征患者的下肢生物力学特征[J]. *中国组织工程研究*, 2025,29(21):4458-4468.
- [50] EMAMVIRDI M, HOSSEINZADEH M, LETAFATKAR A, et al. Comparing kinematic asymmetry and lateral step-down test scores in healthy, chronic ankle instability, and patellofemoral pain syndrome female basketball players: a cross-sectional study. *Sci Rep*. 2023;13(1):12412.
- [51] WAITEMAN MC, BRIANI RV, LOPES HS, et al. People with patellofemoral pain have bilateral deficits in physical performance regardless of pain laterality. *J Athl Train*. 2024;59(11):1110-1117.
- [52] 吕福祥, 张泽根, 黄雪晴, 等. 高水平太极拳运动员下肢功能不对称与蹬脚动作表现关联性研究[J]. *武汉体育学院学报*, 2024,58(6):89-96.
- [53] 杨晓巍, 姚英策, 吴菁, 等. 肌肉电刺激结合肌力训练对髌股疼痛综合征人群单腿下蹲动作生物力学特征的影响[J]. *体育科学*, 2023,43(8):52-60+66.
- [54] LISKA F, VON DEIMLING C, OTTO A, et al. Distal femoral torsional osteotomy increases the contact pressure of the medial patellofemoral joint in biomechanical analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2019;27(7):2328-2333.
- [55] CHEN S, CHANG WD, WU JY, et al. Electromyographic analysis of hip and knee muscles during specific exercise movements in females with patellofemoral pain syndrome: An observational study. *Medicine (Baltimore)*. 2018;97(28):e11424.
- [56] BRIANI RV, DE OLIVEIRA SILVA D, FLÓRIDE CS, et al. Quadriceps neuromuscular function in women with patellofemoral pain: Influences of the type of the task and the level of pain. *PLoS One*. 2018;13(11):e0207421.
- [57] SELKOWITZ DM, BENECK GJ, POWERS CM. Comparison of electromyographic activity of the superior and inferior portions of the gluteus maximus muscle during common therapeutic exercises. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2016;46(9):794-799.
- [58] WILLSON JD, KERNOZEK TW, ARNDT RL, et al. Gluteal muscle activation during running in females with and without patellofemoral pain syndrome. *Clin Biomech (Bristol)*. 2011;26(7):735-740.
- [59] PAYNE K, PAYNE J, LARKIN TA. Patellofemoral pain syndrome and pain severity is associated with asymmetry of gluteus medius muscle activation measured via ultrasound. *Am J Phys Med Rehabil*. 2020;99(7):595-601.
- [60] DE OLIVEIRA SILVA D, MAGALHÃES FH, FARIA NC, et al. Lower amplitude of the hoffmann reflex in women with patellofemoral pain: thinking beyond proximal, local, and distal factors. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016;97(7):1115-1120.

(责任编辑: MZH, ZN, WL, LCH)