

文章编号: 1004-7220(2025)02-0284-07

# 不同病程髌股关节痛患者跑步地面反作用力特征的支持向量机分析

史鹏程<sup>1,2</sup>, 李翰君<sup>1</sup>, 时会娟<sup>1,2</sup>

(1. 北京体育大学 运动人体科学学院, 国家体育总局体能训练与身体机能恢复实验室, 北京 100084;

2. 北京体育大学 运动康复科学教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**目的 通过支持向量机(support vector machine, SVM)分类器和特征选择方法探究髌股关节痛(patellofemoral pain, PFP)患者跑步中的动力学特征,为PFP的预防与康复提供理论支持。**方法** 使用SVM分类模型,根据受试者跑步的动力学特征对健康人( $n=13$ )、PFP长病程患者( $n=13$ )和PFP短病程患者( $n=10$ )进行分类分析。通过特征选择方法筛选出对分类最有效的最小特征集。**结果** 构建的分类模型准确率达83.3%。筛选到的最小特征集中包含3个关键特征,其中PFP短病程患者表现为冲击谷值和主动峰值出现时间的延迟,而PFP长病程患者则表现为冲击峰-冲击谷斜率较低。**结论** PFP短病程患者的主要表现是缓冲过程延长和蹬伸动作延迟,PFP长病程患者最主要的表现是垂直反作用力冲击峰-冲击谷斜率较低。这些特征揭示了PFP在不同病程的特异性特征,为制定个性化的康复方案提供依据。

**关键词:** 髌股关节痛; 跑步; 支持向量机; 特征选择; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.02.005

## Support Vector Machine Analysis on Ground Reaction Force Characteristics of Patients with Patellofemoral Pain in Different Disease Courses

SHI Pengcheng<sup>1,2</sup>, LI Hanjun<sup>1</sup>, SHI Huijuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Sport Science, Key Laboratory for Performance Training & Recovery of General Administration of Sport, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Exercise Rehabilitation Science of Ministry of Education, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

**Abstract: Objective** To investigate the dynamic features of patients with patellofemoral pain (PFP) during running by using support vector machine (SVM) classifier and feature selection method, so as to provide a theoretical support for the prevention and rehabilitation of PFP. **Methods** An SVM classification model was used to classify healthy individuals ( $n=13$ ), PFP patients with long-term disease course ( $n=13$ ), and PFP patients with short-term disease course ( $n=10$ ) based on their dynamic features during running. The most effective minimum feature set was selected through feature selection method. **Results** The accuracy rate of the constructed classification model was 83.3%. The minimum feature set selected contained 3 key features. PFP patients with short-term disease course showed a delay in the appearance of impact valleys and active peaks,

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(32401090), 中央高校基本科研业务费专项资金(2024TJNJ006)

通信作者: 时会娟, 讲师, E-mail: shihuijuan1103@163.com

while PFP patients with long-term disease course showed a lower impact peak-valley slope. **Conclusions** PFP patients with short-term disease course mainly showed a prolonged shock absorption process and a delayed propulsion action, while PFP patients with long-term disease course showed the most significant feature of having a lower vertical reaction force impact peak-valley slope. These features revealed the specific characteristics of PFP at different stages of the disease, providing a basis for developing individualized rehabilitation programs.

**Key words:** patellofemoral pain; running; support vector machine; feature selection; biomechanics

髌股关节痛(patellofemoral pain, PFP)是一种常见的肌肉骨骼疾病,也是膝关节最常见的损伤类型之一。PFP通常表现为在下蹲、跑步、上下楼梯、坐位站起时伴随的前膝弥漫性疼痛,并且疼痛会随着膝关节活动增多而加重<sup>[1-2]</sup>。一项系统综述显示,普通人群PFP的年患病率为22.7%,而在青少年中更高达28.9%。特殊人群中,新兵的年发病率为(9.7~571.4)/1 000人,青少年业余运动员每赛季的发病率为5.1%~14.9%<sup>[3]</sup>。在跑者中,PFP发病率尤为显著。Thijs等<sup>[4]</sup>研究发现,在1项为期10周的“开始跑步”计划期间,16.7%新手跑者患有PFP。PFP具有高复发性和长期性,约90%患者在发病4年后仍有疼痛症状,其中25%患者疼痛持续长达20年<sup>[5]</sup>。这种疼痛和功能障碍不仅严重影响日常生活和运动表现,还可能进一步发展为不可逆的髌股关节炎<sup>[6]</sup>。因此,人们对PFP有效康复方法的需求愈加迫切,而明确PFP患者的异常运动模式是实现有效康复的前提。

目前,大量研究已揭示PFP患者在关节运动学、关节动力学和肌电活动方面存在异常。与运动学和肌电数据易受测量误差及个体差异影响相比,地面反作用力(ground reaction force, GRF)数据能更直接反映身体与地面的相互作用,具有较高的稳定性和可测性。已有研究表明,PFP患者在GRF特征上表现出显著的异常。Nunes等<sup>[7]</sup>研究发现,PFP患者在单腿垂直落地起跳时,垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF)峰值更大。而Ali等<sup>[8]</sup>Meta分析显示,PFP患者跑步时冲击峰(vGRF第1峰峰值)和主动峰(vGRF第2峰峰值)均有所降低。此外,有研究表明,跑步冲击阶段的垂直加载率可能是PFP的危险因素<sup>[9-10]</sup>,但这一观点也存在争议<sup>[11]</sup>。另外,PFP跑者在GRF前后方向上的制动冲量也有显著降低<sup>[12-13]</sup>。研究还发现,髌股关节炎和健康个体之间的分类模型中,vGRF

的峰谷连线斜率是一个重要的分类指标<sup>[14]</sup>。由于PFP可能会增加髌股骨关节炎的风险,故这一斜率指标在PFP的异常模式分析中可能同样有效。这些研究提示,GRF特征不仅能够反映PFP患者的异常运动模式,还可能为病情进展及康复干预提供重要依据。

然而,现有关于GRF的研究多使用推断统计方法,如多变量方差分析,主要集中于识别PFP患者与健康人之间的差异性指标。尽管这些研究发现了个别指标的显著差异,但这些单一指标难以支持个体分类。相较之下,机器学习方法能基于多个指标构建数学模型,更高效地实现健康人和PFP患者的区分。已有研究采用分类和回归树方法,通过垂直方向的加载率和前后方向的制动冲量对跑步者是否患有PFP进行分类<sup>[12]</sup>,但该研究未整合更多潜在重要特征。

此外,机器学习中的特征选择算法还能够提取出最具诊断价值的最小特征集,这不仅提升分类模型的效率,也为精准康复提供依据。在分类器方面,支持向量机(support vector machine, SVM)更具优势。与线性判别分析和多元回归分析相比,SVM能够有效处理高维特征数据,且对异常值和噪声具有较强的鲁棒性,这使它具有较强的泛化能力。此外,与神经网络、随机森林等方法相比,SVM更适合用于小样本量的分类问题,并且其可解释性更强<sup>[15]</sup>。SVM已经被应用于动作模式识别。Lai等<sup>[16]</sup>使用SVM分类器和受试者三维GRF数据区分PFP患者和健康受试者,采用爬坡特征选择算法选择特征,分类成功率接近90%。因此,应用人工智能和机器学习方法实现人群分类,探索最小特征集,有助于识别患者的异常运动模式,为PFP患者的康复训练提供依据。

本文采用SVM分类算法,基于跑步过程中的三维GRF特征,对是否患有PFP以及不同病程PFP患者进行分类识别,并用ANOVA特征排序算法提

取出与 PFP 患者相关的关键跑步 GRF 特征,这些特征可能是重要的导致 PFP 的危险因素或病情加重的潜在因素。研究结果为 PFP 患者的异常运动模式识别和康复训练设计提供理论支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

由于短病程和长病程 PFP 患者的治疗方法和治疗效果不同<sup>[17-18]</sup>,从 18~40 岁业余跑步爱好者人群中招募受试者。定义 PFP 患者症状持续不超过 3 个月为短病程,症状持续超过 12 个月为长病程<sup>[19]</sup>。最终,共纳入 10 名短病程患者(5 名男性,5 名女性),13 名长病程患者(10 名男性,3 名女性),以及 13 名健康对照者(6 名男性,7 名女性)。3 组受试者根据性别、年龄和身体活动时间进行匹配,以最大程度控制其他混杂因素对结果的影响。所有受试者在跑步时均为足跟着地的方式。

PFP 患者的诊断和筛选标准基于《国际功能、残疾和健康分类——髌股关节痛临床实践指南》<sup>[20]</sup>。纳入标准为:① 在跑步、跳跃、上/下楼梯和单腿下蹲等活动中或活动后,至少有 1 项活动有髌股关节疼痛症状;② 跑龄至少为 2 年,每周至少跑 10 km。排除标准为:① 有髌骨脱位、半脱位或膝关节关节炎的病史;② 有下肢骨科手术史;③ 有其他任何神经、肌肉骨骼或心血管疾病。对照组要求无膝关节疼痛症状,且实验前 1 年内无下肢损伤和手术史,膝关节活动没有受限。所有受试者的筛查统一由 1 位经验丰富的康复治疗师完成,测试前告知受试者实验流程并签署知情书,同时采集受试者的基本信息(见表 1)。本研究在测试前已通过北京体育大学伦理委员会审批(2022045 H)。

表 1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

指标	对照组 (n=13)	长期痛组 (n=13)	短期痛组 (n=10)
年龄/岁	23.9±2.1	24.1±2.5	24.0±4.2
身高/m	1.69±0.09	1.75±0.07	1.70±0.06
体重/kg	60.85±7.38	65.85±8.32	63.35±6.84
患侧腿(左/右)	—	5/8	8/2
跑龄/年	3.9±2.7	3.9±1.7	3.7±2.6
周跑距离/km	14.4±7.8	21.2±21.0	17±12.8
Kujala 评分	—	84.6±6.9	84.0±7.6

### 1.2 数据采集

应用三维测力台(采样频率为 1 kHz, Kistler 公司,瑞士)采集受试者跑步动作的动力学数据。速度通过 Newtest Powertiner 便携式测速系统(Newtest 公司,芬兰)监控,两个测速仪红外发射装置置于测力台一侧,间距为 3 m。受试者需在(3.0±0.3) m/s 速度下以正常步态进行跑步,不得进行任何步伐调整,单脚着地于测力台面视为 1 次有效测试(见图 1)。长期痛组和短期痛组使用患侧腿,对照组使用优势侧腿,分别进行 6 次测试,取受试者后足着地的测试进行分析,共 115 人次。

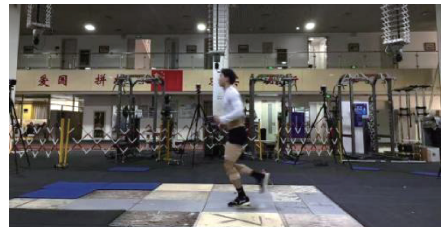


图 1 测试环境与动作示意图

Fig. 1 Test environment and action diagram

### 1.3 数据处理

用 Visual 3D 软件处理 GRF 数据。由于对 GRF 进行滤波可能会丢失有价值的信息,本文未对 GRF 数据进行滤波。使用原始 vGRF 数据除以受试者体重(body weight, BW)进行标准化处理。并用 Visual 3D 软件标准化为 101 个点。对 PFP 患者患侧腿和健康受试者优势侧腿的 3 次实验的特征数据进行平均,然后对其进行标准化。受试者足跟着地时刻(heel strike)使用 vGRF 首次超过 10 N 的时刻来定义,足尖离地时刻(toe off)使用 vGRF 首次低于 10 N 的时刻来定义。

如图 2 所示,根据前人研究,选出 19 个三维 GRF 的相关特征:vGRF 平均加载率( $V_1$ , vGRF 20%~80% 的平均斜率)、vGRF 瞬时加载率( $V_2$ , vGRF 20%~100% 的任意两个连续点之间的峰值垂直载荷率)、制动冲量(后向 GRF 在时间上的积分,见图 2 中阴影区 BI)<sup>[12]</sup>。vGRF 冲击峰(第 1 峰)峰值( $F_1$ )及到达时间( $T_1$ )、vGRF 主动峰(第 2 峰)峰值( $F_3$ )及到达时间( $T_3$ )、vGRF 冲击谷值( $F_2$ )及到达时间( $T_2$ );前后方向 GRF 制动力峰值( $F_4$ )及到达时间( $T_4$ )、前后方向 GRF 推进力峰值( $F_5$ )及到达时间( $T_5$ )、外侧反作用力峰值( $F_6$ )及到达时间

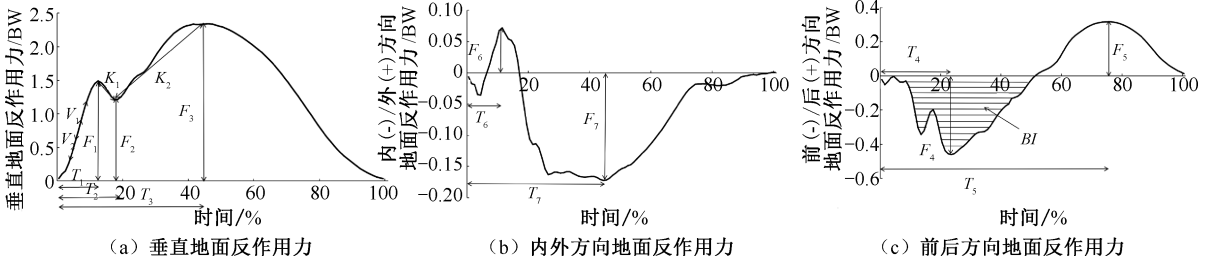


图2 地面反作用力特征

Fig. 2 Characteristics of ground reaction force (GRF) (a) Vertical GRF, (b) Medial-lateral GRF, (c) Anterior-posterior GRF

( $T_6$ )、内侧反作用力峰值 ( $F_7$ ) 及到达时间 ( $T_7$ )<sup>[16,21-22]</sup>。此外,加入未曾在 PFP 分类研究中使用过,但在髌股骨关节炎分类研究中起重要作用的斜率指标<sup>[14]</sup>: $vGRF$  冲击峰-冲击谷斜率 ( $K_1$ )、冲击谷-主动峰斜率 ( $K_2$ )。

### 1.4 模型建立

**数据预处理:**对各个变量进行多元正态性检验和相关性,将非正态分布的变量使用数据转换技术(对数转换)进行预处理,剔除相关性过高的变量。

常见的特征提取方法有过滤法、包装法和嵌入法。而包装法和嵌入法将特征提取方法与模型训练过程相结合,可能导致依赖特定模型所导致的过拟合问题,而过滤法独立于模型,可以避免这一问题<sup>[23]</sup>,故采用过滤法中的 ANOVA 特征选择方法计算特征的重要性评分。该算法通过计算各个特征与目标变量之间的方差比值 ( $F$ ),评估特征与目标变量之间的相关性。 $F$  越大,表明该特征越重要。

线性支持向量机 (linear support vector machine, LSVM) 的核心目标是识别特征空间中的最优超平面,以有效地将给定的训练样本集划分为两个不同的类。与其他核函数 (如多项式核、RBF 核) 相比,LSVM 的决策边界表达为 1 条直线 (或高维空间中的超平面),使得模型更容易理解和解释<sup>[24]</sup>。这个超平面本质上由决策函数定义:

$$d(t) := \mathbf{w} \cdot \mathbf{t} + b \quad (1)$$

式中: $\mathbf{w}$  为权重向量; $\mathbf{t}$  为样本的特征向量; $b$  为样本偏差。假设 1 个训练数据集包含  $m$  个样本,记为  $\{(t_1, y_1), \dots, (t_m, y_m)\}$ ,其中每个  $t_j$  属于实值向量空间  $r_m$ ,表示  $m$  个元素的第  $j$  个样本。 $y_j$  是分配给每个样本的标签,从集合  $\{-1, 1\}$  中取值。一般情况下, $-1$  代表一个类, $+1$  代表另一个类。训练过程旨在寻找使得两类数据点间间隔最大的超平面,即找

到最优的  $\mathbf{w}$  和  $b$ 。在训练完成后,可以使用决策函数对新的、未遇到过的数据进行预测和分类:

$$\text{分类结果} = \begin{cases} \text{对照组,} & \text{if } d(t) > 0 \\ \text{患者,} & \text{if } d(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

未标记样本  $t$  的分类可以通过使用式 (2) 计算  $d(t)$  来确定。当结果为负时,分类是患者组的;否则,分类是对照组的。

构建多分类支持向量机 (multi-class SVM, MCSVM) 分类器通常涉及创建多个两类分类器。例如,在每两类之间计算 1 个超平面,从而得到 1 个  $k$  类分类器。因此,超平面的总数为  $C_k^2$ 。SVM 和 ANOVA 特征选择方法使用 Matlab R2022b 中的分类学习器 (Classification Learner) 完成。

**模型验证方面:**通常采用  $K$  折交叉验证或留一交叉验证,但  $K$  折交叉验证的情况不唯一,且本实验样本量较小,因此采用留一交叉验证来检验线性模型的准确率。

**超参数调优方面:**由于 LSVM 只存在 1 个参数 (Box Constraint Level),且 Box Constraint Level 越大,过拟合风险越高,因此,在 1~15 范围内寻找表现最优的超参数。对特征个数和参数调优进行组合,找到分类效果最佳的模型。

### 1.5 模型评估

模型的评估指标包括准确率 (accuracy)、精准率 (precision)、召回率 (recall) 与  $F1$  分数 ( $F1$ -score),具体计算公式如下:

$$\text{准确率} = \frac{\text{真正例} + \text{真负例}}{\text{真正例} + \text{真负例} + \text{假正例} + \text{假负例}} \quad (3)$$

$$\text{精准率} = \frac{\text{真正例}}{\text{真正例} + \text{假正例}} \quad (4)$$

$$\text{召回率} = \frac{\text{真正例}}{\text{真正例} + \text{假负例}} \quad (5)$$

$$F1 \text{ 分数} = \frac{2 \times \text{精准率} \times \text{召回率}}{(\text{精准率} + \text{召回率})} \quad (6)$$

模型的精准率、召回率、F1 分数的计算方法为 3 个组别指标的平均值。

## 2 实验结果

结果表明,LSVM 分类的准确率、精确率、召回率、F1 分数分别为 83.3%、82.9%、82.3%、82.5%,LSVM 可以成功地对具有 PFP 的人及不同病程的 PFP 进行分类。分类结果的混淆矩阵如图 3 所示。

实际分类	短期痛组	7	1	2
	长期痛组	0	12	1
	对照组	2	0	11
		短期痛组	长期痛组	对照组
		预测分类		

图 3 线性支持向量机混淆矩阵

Fig. 3 Confusion matrix of linear support vector machine

注:第 1 行第 1 列中的 7 表示有 7 个短期痛组受试者被预测为短期痛组;同理,第 1 行第 2 列的 1 表示有 1 个短期痛组受试者被错误预测为长期痛组。

本文发现,起重要作用的特征是 vGRF 主动峰出现时间、vGRF 冲击峰-冲击谷斜率和 vGRF 冲击谷到达时间。具体而言,PFP 短病程患者最明显的特征冲击谷值和主动峰值出现时间延迟,PFP 长病程患者最明显的特征是冲击峰-冲击谷斜率较低(见表 3)。

表 2 支持向量机最佳子集中各组情况

Tab. 2 Situation of each group in the optimal subset of support vector machine

分组	冲击峰-冲击谷斜率/(BW/%)	vGRF 主动峰到达时间/%	vGRF 冲击谷到达时间/%
短期痛组	0.040±0.012	47.9±2.5	20.8±1.9
长期痛组	0.009±0.003	45.7±3.0	19.7±2.2
对照组	0.040±0.028	41.8±2.4	18.0±1.5
重要性评分	17.91	10.26	5.08

## 3 讨论

本文发现,冲击峰-冲击谷斜率在区分长期痛组中起到了重要作用。在跑步过程中,GRF 曲线反映了跑者与地面接触时产生的冲击力和缓冲力。vGRF 曲线通常呈现 1 个明显的“冲击峰值”和随后的“缓冲谷值”,其中峰值代表脚着地时瞬间的冲击力,而谷值则是着地后肌肉和关节开始缓冲和吸收冲击力时的最低反作用力。冲击力峰值和谷值之间的斜率,直接反映了跑者在触地后如何迅速减速或吸收冲击力。本文结果表明,长期痛组冲击峰-冲击谷斜率较低,反映患者对冲击力的吸收速度降低,这可能代表神经肌肉控制的不足。研究表明,PFP 患者通常伴有神经肌肉控制模式的改变,特别是股四头肌的抑制,以减少活动期间髌股关节的反作用力<sup>[25-26]</sup>。此外,也有可能是 PFP 患者的蹬伸动作较慢,导致冲击力的吸收过程减缓。本文推测,该结果是由肌肉反应延迟<sup>[27]</sup>或力量输出不足导致。

此外,本文还发现,短期痛组和长期痛组受试者 vGRF 主动峰出现时间相比对照组均表现出延迟,推测原因是股内侧肌的激活延迟<sup>[27]</sup>,导致 PFP 患者的蹬伸动作较慢。该结果进一步验证了神经肌肉控制模式改变对 PFP 患者影响的重要性。这些发现凸显了早期干预的重要性。由于 PFP 患者的神经肌肉控制模式可能发生改变,相应的神经肌肉训练可以帮助患者改善股内侧肌等关键肌群的募集能力<sup>[28]</sup>,从而提高冲击力吸收能力。PFP 患者也可以通过跑姿的调整来改善冲击力的吸收。例如,适当地增加步频<sup>[29]</sup>和降低步幅<sup>[30]</sup>可以降低髌股关节负荷,从而降低冲击吸收过程中的负担。

将冲击峰-冲击谷斜率作为 PFP 分类模型的重要特征用于 PFP 研究的机器学习方向,目前的研究鲜有报道。本文验证了此特征在 PFP 分类方面的贡献。在判断受试者是否患有 PFP 的分类方面,相比于前人基于其他特征的分类模型,本文 LSVM 模型在三分类情况下达到了 83.3% 的准确率,除了能判断是否患有 PFP,还能判断病程,并且解释性好。相比之下,虽然 Lai 等<sup>[16]</sup>使用多项式核支持向量机模型的分类准确率达到 88.9%,但模型的解释性较差;文献[12]中树模型分类虽解释性强,但分类准确率仅为 81.6%。因此,本文模型在准确性和解释

性之间实现了较好的平衡。这种自动分类方法在未来的步态诊断和康复干预评估中具有重要应用价值,尤其是在识别 PFP 高风险人群方面。

本文未观察到 PFP 患者 vGRF 冲击峰和主动峰的显著差异,这与前人研究结果不完全一致<sup>[11,21-22]</sup>。有研究发现,PFP 患者 vGRF 冲击峰较小<sup>[21-22]</sup>,这可能与跑速有关,该研究允许受试者自选跑速;而 PFP 患者可能因心理因素倾向于选择较低跑速<sup>[31]</sup>,从而导致较低的冲击峰峰值。部分研究发现,PFP 患者的 vGRF 主动峰峰值更低<sup>[11,21]</sup>,这可能是实验环境不同所导致。上述研究采用跑步机测试,而本文在真实地面条件下进行测量,环境差异可能影响了 GRF 的表现。尽管如此,本文重点考察冲击力吸收过程的异常,而非冲击力峰值本身,这与传统观点存在偏差,但这一视角的转变对深入理解 PFP 机制和选择康复策略具有重要意义。

本研究仍存在一定的局限性:① 作为横断面分析,无法明确所选出重要特征是 PFP 的致病因素还是患病后的代偿因素。未来的纵向研究应探索这些特征的因果关系。② 在区分受试者是否患有 PFP 及 PFP 病程方面的效果不错,但受试者较少,且性别比例不均。考虑女性 PFP 患病率显著高于男性<sup>[32]</sup>,未来研究应结合更多样本与纵向数据,进一步优化分类模型,并探索基于运动控制机制的个性化干预策略。

## 4 结论

本文建立 SVM 分类模型,分析 PFP 患者跑步过程中 GRF 的特征,并筛选出关键指标,包括 vGRF 主动峰到达时间、冲击谷到达时间以及冲击峰-冲击谷斜率。结果表明,模型表现出较高的分类准确性,能够有效区分不同病程的 PFP 患者。PFP 短病程患者的主要特征是缓冲期延长和蹬伸动作延迟,而 PFP 长病程患者则表现出较低的冲击峰-冲击谷斜率。本研究提出的 GRF 特征,不仅为识别 PFP 患者异常运动模式提供了新思路,还可为制定个性化康复方案提供依据,特别在于优化冲击吸收能力和改善运动控制方面具有重要意义。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:史鹏程负责收集数据,分析并解读实验结果,制作图表,撰写论文;李翰君、时会

娟负责设计实验,收集数据,修改论文。

## 参考文献:

- [1] 马彦韬,李丽辉,赵佳敏,等. 髌股疼痛综合征的病因学和治疗现状[J]. 重庆医学, 2019, 48(23): 4084-4089.
- [2] WILLY RW, HOGLUND LT, BARTON CJ, et al. Patellofemoral pain [J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2019, 49(9): CPG1-CPG95.
- [3] SMITH BE, SELFE J, THACKER D, et al. Incidence and prevalence of patellofemoral pain: A systematic review and meta-analysis [J]. PLoS One, 2018, 13(1): e0190892.
- [4] THIJS Y, DE CLERCQ D, ROOSEN P, et al. Gait-related intrinsic risk factors for patellofemoral pain in novice recreational runners [J]. Br J Sports Med, 2008, 42(6): 466-471.
- [5] NASCIMENTO LR, TEIXEIRA-SALMELA LF, SOUZA RB, et al. Hip and knee strengthening is more effective than knee strengthening alone for reducing pain and improving activity in individuals with patellofemoral pain: A systematic review with meta-analysis [J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2018, 48(1): 19.
- [6] CROSSLEY KM, STEFANIK JJ, SELFE J, et al. 2016 Patellofemoral pain consensus statement from the 4<sup>th</sup> International Patellofemoral Pain Research Retreat, Manchester. Part 1: Terminology, definitions, clinical examination, natural history, patellofemoral osteoarthritis and patient-reported outcome measures [J]. Br J Sports Med, 2016, 50(14): 839-843.
- [7] NUNES GS, BARTON CJ, SERRAO FV. Females with patellofemoral pain have impaired impact absorption during a single-legged drop vertical jump [J]. Gait Posture, 2019 (68): 346-351.
- [8] YALFANI A, AHMADI M. Patients with Patellofemoral pain exhibiting decrease vertical ground reaction force compared to healthy individuals during weight bearing tasks: A systematic reviews and meta-analysis [J]. Iran J Public Health, 2023, 52(2): 254-264.
- [9] DAVIS IS, BOWSER BJ, MULLINEAUX DR. Greater vertical impact loading in female runners with medically diagnosed injuries: A prospective investigation [J]. Br J Sports Med, 2016, 50(14): 887-892.
- [10] JOHNSON CD, TENFORDE AS, OUTERLEYS J, et al. Impact-related ground reaction forces are more strongly associated with some running injuries than others [J]. Am J Sports Med, 2020, 48(12): 3072-3080.
- [11] ESCULIER JF, ROY JS, BOUYER LJ. Lower limb control and strength in runners with and without patellofemoral pain

- syndrome [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(3): 813-819.
- [12] DE SOUZA JUNIOR JR, GAUDETTE LW, JOHNSON CD, *et al.* Interaction of biomechanical, anthropometric, and demographic factors associated with patellofemoral pain in rearfoot strike runners: A classification and regression tree approach [J]. *Sports Med Open*, 2024, 10(1): 5.
- [13] WILLWACHER S, KURZ M, ROBBIN J, *et al.* Running-related biomechanical risk factors for overuse injuries in distance runners: A systematic review considering injury specificity and the potentials for future research [J]. *Sports Med*, 2022, 52(8): 1863-1877.
- [14] KOTTI M, DUFFELL LD, FAISAL AA, *et al.* Detecting knee osteoarthritis and its discriminating parameters using random forests [J]. *Med Eng Phys*, 2017(43): 19-29.
- [15] VAPNIK VN. *The nature of statistical learning theory* [M]. New York: Springer, 1995.
- [16] LAI DT, LEVINGER P, BEGG RK, *et al.* Automatic recognition of gait patterns exhibiting patellofemoral pain syndrome using a support vector machine approach [J]. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 2009, 13(5): 810-817.
- [17] WINTERS M, HOLDEN S, LURA CB, *et al.* Comparative effectiveness of treatments for patellofemoral pain: A living systematic review with network meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 2020, 55(7): 369-377.
- [18] DAVIS IS, POWERS C. Patellofemoral pain syndrome: Proximal, distal, and local factors an international research retreat [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2010, 40(3): A1-A48.
- [19] FOX A, FERBER R, SAUNDERS N, *et al.* Gait kinematics in individuals with acute and chronic patellofemoral pain [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2018, 50(3): 502-509.
- [20] DOYLE E. Appraisal of clinical practice guideline: Patellofemoral pain: clinical practice guidelines linked to the international classification of functioning, disability and health from the Academy of Orthopaedic Physical Therapy of The American Physical Therapy Association [J]. *J Physiother*, 2020, 66(2): 134.
- [21] DUFFEY MJ, MARTIN DF, CANNON DW, *et al.* Etiologic factors associated with anterior knee pain in distance runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(11): 1825-1832.
- [22] MESSIER SP, DAVIS SE, CURL WW, *et al.* Etiologic factors associated with patellofemoral pain in runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1991, 23(9): 1008-1015.
- [23] CHANDRASHEKAR G, SAHIN F. A survey on feature selection methods [J]. *Comput Electr Eng*, 2014, 40(1): 16-28.
- [24] THARWAT A. Parameter investigation of support vector machine classifier with kernel functions [J]. *Knowledge and Information Systems*, 2019, 61(3): 1269-1302.
- [25] GREUEL H, HERRINGTON L, LIU A, *et al.* How does acute pain influence biomechanics and quadriceps function in individuals with patellofemoral pain? [J]. *Knee*, 2019, 26(2): 330-338.
- [26] SALSICH GB, BRECHTER JH, POWERS CM. Lower extremity kinetics during stair ambulation in patients with and without patellofemoral pain [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(10): 906-912.
- [27] CAVAZZUTI L, MERLO A, ORLANDI F, *et al.* Delayed onset of electromyographic activity of vastus medialis obliquus relative to vastus lateralis in subjects with patellofemoral pain syndrome [J]. *Gait Posture*, 2010, 32(3): 290-295.
- [28] NIE Q, YU Y, YUAN Z, *et al.* Effects of adding neuromuscular electrical stimulation to functional training on muscle recruitment, pain reduction, and knee joint function in patellofemoral pain syndrome patients [J]. *Medicine*, 2024, 103(3): e36095.
- [29] DOS SANTOS AF, NAKAGAWA TH, SERRAO FV, *et al.* Patellofemoral joint stress measured across three different running techniques [J]. *Gait Posture*, 2019(68): 37-43.
- [30] BOYER ER, DERRICK TR. Lower extremity joint loads in habitual rearfoot and mid/forefoot strike runners with normal and shortened stride lengths [J]. *J Sports Sci*, 2018, 36(5): 499-505.
- [31] SELHORST M, FERNANDEZ-FERNANDEZ A, SCHMITT L, *et al.* Adolescent psychological beliefs, but not parent beliefs, associated with pain and function in adolescents with patellofemoral pain [J]. *Phys Ther Sport*, 2020(45): 155-160.
- [32] BOLING M, PADUA D, MARSHALL S, *et al.* Gender differences in the incidence and prevalence of patellofemoral pain syndrome [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2010, 20(5): 725-730.