

文章编号:1004-7220(2020)06-0672-07

髌股关节痛业余跑者性别特异的下肢生物力学特征

杨辰¹, 曲峰², 刘卉², 万祥林², 冯茹^{1,2}, 于冰³(1.南京体育学院 运动健康学院,南京 210014; 2.北京体育大学 运动人体科学学院,北京 100084;
3.美国北卡罗来纳大学教堂山分校 人体运动科学中心,北卡罗来纳 27599)

摘要:目的 研究髌股关节痛(patellofemoral pain,PFP)业余跑者性别特异的下肢生物力学特征。方法 选取15名男性和10名女性PFP业余跑者作为实验组,并匹配25名无损伤业余跑者作为对照组。采集所有受试者跑步时的下肢运动学、动力学和表面肌电数据。采用双因素方差分析确定组别与性别对跑步时下肢生物力学特征的影响。结果 男性PFP业余跑者跑步缓冲期最大膝屈角度显著大于对照组;男性和女性PFP业余跑者跑步缓冲期最大髋内收角度显著大于对照组,且女性显著大于男性。结论 不同性别PFP业余跑者在跑步时表现出不同的下肢生物力学特征,PFP临床治疗应具有性别特异性。

关键词:髌股关节痛;跑步;性别差异;下肢;生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.06.004

Sex-Specific Lower Extremity Biomechanics of Amateur Runners with Patellofemoral Pain

YANG Chen¹, QU Feng², LIU Hui², WAN Xianglin², FENG Ru^{1,2}, YU Bing³

(1.School of Sports and Health, Nanjing Sport Institute, Nanjing 210014, China; 2.School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 3.Center for Human Movement Science, University of North Carolina at Chapel Hill, North Carolina 27599, USA)

Abstract: Objective To study the sex-specific lower extremity biomechanics of amateur runners with patellofemoral pain (PFP). **Methods** Fifteen male and ten female amateur runners with PFP were identified and enrolled in PFP group, twenty-five healthy amateur runners matched with the PFP group were recruited as control group. The kinematics and kinetics, surface electromyography (EMG) data from all the subjects in the running task were collected. Two-way analysis of variance was performed to determine the influence of group and sex on lower extremity biomechanics during running. **Results** Compared with control group, male amateur runners with PFP showed a greater peak knee flexion angle during the landing phase of running. Compared with control group, male and female amateur runners with PFP showed a greater peak hip adduction angle during the landing phase of running, while the peak hip adduction angle of female participants was significantly greater than that of male participants. **Conclusions** Amateur runners with PFP showed sex-specific lower extremity biomechanics in the running task, and the clinical intervention for PFP should be sex-specific.

Key words: patellofemoral pain (PFP); running; sex difference; lower extremity; biomechanics

收稿日期:2019-12-09; 修回日期:2020-01-31

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB320009),江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2017766)

通信作者:曲峰,教授,博士生导师,E-mail:qufeng929@163.com

髌股关节痛(patellofemoral pain, PFP)是跑步人群最常见的下肢过劳损伤之一,主要症状为功能性活动中膝关节髌周或髌后出现疼痛^[1]。PFP常见于体力活动较多的群体,其中业余跑者年发病率为4%~21%,而女性发病率大约是男性的2.23倍^[2]。首次出现PFP症状后,70%~90%患者可能出现复发或慢性症状,并可能导致骨性关节炎的发生^[3]。

明确PFP患者的生物力学特征对于了解该损伤有重要意义。PFP病因是多方面的,其危险因素可分为外在因素(运动强度、装备、场地环境等)和内在因素(身体结构、肌力和紧张度、生物力学特征等)^[1]。而错误的动作模式,如髌内收和内旋角度增大、膝外展角度和力矩增大、足旋前过度和股内侧肌激活延迟等,均被认为可能提高髌股关节应力而造成损伤,但当前研究结果尚不统一^[4]。横向研究常用以辅助前瞻性研究来认识危险因素,并将患者所表现出的生物力学特征作为与PFP相关的因素^[5]。针对这些因素,临床上多采用髌骨护具与贴扎、矫形鞋垫、训练干预等保守方法治疗PFP,但多数研究认为保守治疗很难起到长期的临床作用^[6]。无法明确PFP患者的生物力学特征,可能是治疗效果不佳的主要原因。

确定不同性别PFP患者的生物力学特征有助于建立性别特异的治疗策略。不同群体间PFP患者的表现可能不同,这已成为当前研究的主要方向。性别被认为是PFP的危险因素之一,也是划分患者群体较为简单有效的方式^[7]。性别在组织结构和神经肌肉控制策略等方面均存在差异,故其表现出的生物力学特征就可能不同^[8]。Almonroeder等^[9]研究发现,男性和女性存在不同的动作模式。Boling等^[10]的前瞻性研究表明,PFP存在性别特异的危险因素。虽然目前普遍认为女性比男性更易产生PFP,但是性别差异的作用机制仍不清楚。如果可以明确不同性别PFP患者的生物力学特征,则可以依据性别间不同的特征建立更有针对性的治疗策略。但当前有关建立性别特异性生物力学模型的研究较少,也鲜有针对性别特异的干预方法被提出。因此,需要开展更多的研究来加强对PFP性别特异性的认识。

本文通过采集不同性别PFP和无损伤业余跑

者跑步时下肢运动学、动力学和表面肌电(electromyography, EMG)数据,对比PFP与无损伤业余跑者的差异,并最终确定不同性别PFP业余跑者下肢生物力学特征。研究结果旨在加深对PFP性别特异性的认识,为该损伤的预防和治疗提供理论依据。本文假设PFP业余跑者在跑步缓冲期的下肢运动学、动力学和表面EMG特征具有性别特异性,PFP业余跑者相比于无损伤对照组具体会表现出:①膝关节三维角度、力矩和髌股关节应力更大,以及股内侧肌相比股外侧肌激活延迟、激活程度减小,且这些膝关节局部特征可能只存在于特定性别中;②髌、踝关节在额状面和水平面的角度更大,且这些膝关节近端和远端特征可能在男、女性中均存在,但女性大于男性。

1 研究方法

1.1 受试者

选取25名患有PFP业余跑者(18~40岁)作为实验组,其中男性15人,女性10人。并依据实验组性别、身高、体质量、年龄和跑龄匹配25名无损伤业余跑者作为对照组(见表1)。要求所有跑者均习惯采用足跟着地的跑步方式,跑龄2年以上,周跑量大于10 km。

表1 受试者基本信息

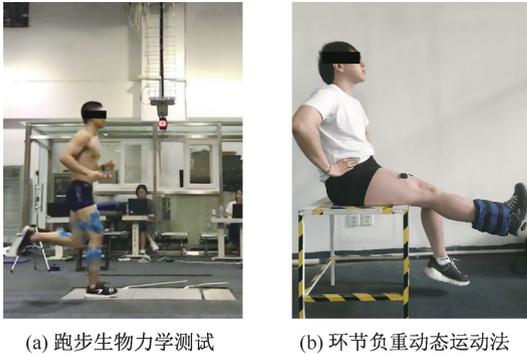
Tab.1 Basic information of the subjects

参数	实验组		对照组	
	男性 (n=15)	女性 (n=10)	男性 (n=15)	女性 (n=10)
身高/cm	177.1±5.3	165.3±4.3	177.6±4.2	165.1±5.4
体质量/kg	75.7±12.0	55.2±3.4	76.5±10.7	56.3±2.5
年龄/岁	27.0±5.6	23.2±3.7	27.3±5.5	25.2±4.4
跑龄/年	5.4±3.3	3.1±1.0	4.9±1.9	3.2±1.9

所有受试者统一由1位康复治疗师进行筛查,筛查标准基于前人研究与共识^[11, 12],纳入标准为:①在跑步、下蹲、久坐、抗阻伸膝、跳跃、上下楼时,至少有两个动作出现过髌后或髌周的疼痛;②疼痛存在3个月以上,且与直接创伤无关;③疼痛等级至少达到10 cm视觉模拟量表(visual analog scale, VAS)的3分以上(0代表无痛,10代表最大疼痛)。排除标准为:①存在其他膝关节病变;②存在髌骨脱位或半脱位;③1年内进行过下肢手术。对照组要求无膝痛症状,且1年内无下肢损伤。

1.2 数据采集

跑步生物力学测试要求受试者穿着紧身衣裤和统一跑鞋。依据体表解剖标志在受试者腰椎 L4~5 棘突中点、两侧髌前上棘,以及采集侧(实验组患病侧,对照组匹配侧)的股骨外侧髁和内侧髁、胫骨粗隆、外踝和内踝、足跟和足尖上粘贴共 10 个反光标志点,并在股内侧肌和股外侧肌安放采集电极。受试者采用足跟着地的跑步方式,跑速控制在 (4.0 ± 0.3) m/s,并以采集侧下肢在测力台上完成支撑[见图 1(a)],每名受试者采集 3 次成功数据。采用环节负重动态运动法作为 EMG 标准化手段^[13]。该方法要求受试者踝关节安置 5 kg 外部负荷,在 30 s 内重复完成 15 次坐位伸膝动作[见图 1(b)]。



(a) 跑步生物力学测试

(b) 环节负重动态运动法

图 1 数据采集方法

Fig.1 Methods of data collection (a) Biomechanical test on running, (b) Segment weight dynamic movement method

应用 8 镜头 Motion Analysis Raptor-4 红外运动捕捉系统(200 Hz, Motion Analysis 公司,美国)、Kistler 9281CA 三维测力台(1 kHz, Kistler Instrumente AG 公司,瑞士)和 Trigno 无线表面肌电仪(2 kHz, Delsys 公司,美国)同步采集标志点三维坐标、地面反作用力和 EMG 信号。

1.3 数据处理

采用截断频率为 13.3 Hz 的 Butterworth 低通滤波对标志点三维坐标进行平滑^[14];采用 10~800 Hz 带通滤波对原始 EMG 信号进行平滑,之后进行全波整流^[15]。

骨盆、大腿、小腿和足部坐标系的建立参照文献^[16]的研究。下肢三维角度通过卡尔丹角方法获得^[17];膝关节三维力矩通过逆动力学方法获得^[17],并相对体重和身高的乘积标准化(BW×BH);

髌股关节应力通过膝屈角度和膝伸力矩推算获得^[18],并相对体重标准化(MPa/N)。EMG 信号的处理参照文献^[16]的研究。EMG 激活顺序通过股内侧肌与股外侧肌收缩起始时刻的差值量化;EMG 激活程度通过股内侧肌与股外侧肌均方根振幅的比值量化,并相对环节负重动态运动中的 EMG 均方根振幅标准化。

计算所有受试者在跑步缓冲期的膝关节三维角度和力矩、髌股关节应力、髌关节与踝关节额状面和水平面角度,以及股内侧肌与股外侧肌的激活时刻差和激活程度比。跑步缓冲期定义为足首次接触测力台时刻到同侧膝关节屈曲最大时刻。所有数据处理应用 Cortex 2.6 (Motion Analysis 公司,美国)完成。

1.4 数据分析

采用双因素方差分析确定组别(实验组和对照组)与性别(男性和女性)对跑步缓冲期下肢生物力学特征的影响。若组别与性别存在交互作用,后继采用独立样本 *t* 检验分别确定同一性别下组别对各指标的影响,以及同一组别下性别对各指标的影响。统计显著性定为一类误差概率不大于 0.05,所有数据分析应用 SPSS 19.0 完成。

2 研究结果

组别和性别对跑步缓冲期的膝关节角度存在一定影响。双因素方差分析显示,组别与性别对最大膝屈角度的交互作用显著($P=0.050$)。独立样本 *t* 检验表明,男性实验组显著大于对照组($P=0.017$),女性则无显著差异($P=0.289$)。对照组女性显著大于男性($P=0.001$),而实验组则无显著的性别差异($P=0.088$)。双因素方差分析显示,组别与性别对最大膝外展角度($P=0.862$)和外旋角度($P=0.200$)均无显著的交互作用,虽然女性的最大膝外展角度($P=0.005$)和外旋角度($P=0.001$)显著大于男性,但实验组最大膝外展角度($P=0.090$)和外旋角度($P=0.074$)与对照组相比无显著差异。

组别和性别对跑步缓冲期膝关节力矩和髌股关节应力存在一定影响。双因素方差分析显示,组别与性别对膝外展力矩峰值无显著的交互作用($P=0.085$),虽然女性显著小于男性($P=0.001$),但实验组与对照组相比无显著差异($P=0.178$),见表 2。

表 2 跑步缓冲期膝关节运动学和动力学特征

Tab.2 Knee kinematics and kinetics during landing phase of running

指标	女性		男性	
	实验组	对照组	实验组	对照组
膝最大屈曲角度/(°)	50.05±6.43	51.65±5.13 [#]	47.95±3.85 [*]	45.97±3.60
膝最大外展角度/(°)	4.81±4.91 [#]	3.76±2.98 [#]	3.16±4.15	1.88±2.71
膝最大外旋角度/(°)	14.92±5.86 [#]	14.31±6.24 [#]	12.20±7.58	8.57±6.90
膝伸力矩峰值/(BW×BH)	0.186±0.026	0.191±0.024	0.186±0.031	0.191±0.031
膝外展力矩峰值/(BW×BH)	0.028±0.013 [#]	0.026±0.015 [#]	0.033±0.021	0.044±0.024
膝外旋力矩峰值/(BW×BH)	0.019±0.006	0.017±0.006	0.021±0.008	0.020±0.006
髌股关节应力峰值/(MPa·N ⁻¹)	0.027±0.005	0.030±0.007	0.028±0.006	0.028±0.006

注: * 与对照组相比有显著差异, # 与男性相比有显著差异

组别和性别对跑步缓冲期表面 EMG 特征存在一定影响。双因素方差分析显示组别与性别对股内侧肌与股外侧肌激活程度比无显著的交互作用 ($P=0.307$), 虽然女性显著小于男性 ($P=0.013$), 但实验组与对照组无显著差异 ($P=0.291$), 见表 3。

组别和性别对跑步缓冲期髌关节和踝关节额状面和水平面角度存在一定影响。双因素方差分析显示, 组别与性别对髌最大内收角度无显著的交互作用 ($P=0.656$), 实验组显著大于对照组 ($P=0.004$), 且女性显著大于男性 ($P=0.001$)。双因素方差分析还显示组别与性别对髌最大内旋角度无

表 4 跑步缓冲期髌、踝关节额状面和水平面角度

Tab.4 Hip and ankle joint angles at frontal and transverse planes during landing phase of running

指标	女性		男性	
	实验组	对照组	实验组	对照组
髌最大内收角度/(°)	15.59±4.50 ^{*#}	13.47±3.79 [#]	11.66±3.55 [*]	10.08±3.84
髌最大内旋角度/(°)	3.57±9.60 [#]	4.08±8.04 [#]	0.31±9.64	0.60±5.68
踝最大外翻角度/(°)	1.47±2.93	2.03±5.57	0.53±5.68	1.98±4.50
踝最大外旋角度/(°)	17.58±5.33	16.09±3.97	17.49±4.91	18.67±5.90

注: * 与对照组相比有显著差异, # 与男性相比有显著差异

3 讨论

本文部分支持了 PFP 业余跑者在跑步缓冲期表现出下肢生物力学特征具有性别特异性的假设。相比于无损伤对照组, 男性 PFP 业余跑者在跑步缓冲期表现出较大的最大膝屈角度, 而男、女性 PFP 业余跑者在跑步缓冲期均表现出较大的最大髌内收角度, 且女性显著大于男性。该结果表明, PFP

表 3 跑步缓冲期股内侧肌与股外侧肌表面肌电特征

Tab.3 EMG of vastus medialis and vastus lateralis muscle during landing phase of running

指标	女性		男性	
	实验组	对照组	实验组	对照组
激活程度比	0.75±0.47 [#]	0.76±0.29 [#]	0.97±0.33	1.17±0.43
激活时刻差/ms	-4.28±15.59	-6.65±14.54	-9.30±17.08	-7.66±12.11

注: # 与男性相比有显著差异

显著的交互作用 ($P=0.638$), 虽然女性显著大于男性 ($P=0.007$), 但实验组与对照组无显著差异 ($P=0.864$), 见表 4。

会对业余跑者下肢生物力学特征产生影响, 且表现出性别差异。

本文发现, 较大的膝屈角度只特定存在于男性患者中, 支持了 PFP 业余跑者表现出膝关节局部特征可能只存在于特定性别中的研究假设。Walsh 等^[19] 研究认为, 男、女性膝屈角度可能受不同肌肉激活特征的影响, 女性为股四头肌主导的策略, 而男性为股四头肌与腘绳肌共激活的策略。本文未

发现女性股内侧肌与股外侧肌 EMG 特征存在组间差异,这可能是其未表现出膝屈角度改变的原因。而男性患者膝屈角度改变还可能受到腘绳肌的影响,但本文未采集腘绳肌 EMG 数据,限制了对膝屈角度的进一步分析。今后研究应加入腘绳肌 EMG 数据采集,进一步了解性别间膝屈角度的影响机制。理论上,膝屈角度增大会导致股四头肌和髌腱在矢状面的夹角减小,从而大幅提高髌股关节受力,并可能导致髌骨横向位移增大,从而减小髌股关节接触面积^[20],最终造成应力增加,而这也是造成 PFP 最主要的原因。因此,本文认为,跑步时较大的膝屈角度与 PFP 有关,且这一特征特定存在于男性患者中。

本文还发现,虽然较大的髌内收角度在男、女性患者中均存在,但是女性显著大于男性,支持了 PFP 业余跑者表现出膝关节远端和近端特征可能在男、女性中均存在,但女性显著大于男性的研究假设。女性骨盆宽度和股骨长度的比值更大,并且在髌关节额状面和水平面的神经肌肉控制能力更差,这些特征都可能导致女性在功能性活动中髌内收角度相对较大^[21]。髌内收角度增大可能造成髌骨相对髌前上棘向内移动,从而潜在增大动态 Q 角(股四头肌拉力线和髌腱之间的夹角)。Huberti 等^[22]研究发现, Q 角增加 10° 会导致髌股关节应力增大约 45%。Noehem 等^[23]研究也表明,髌内收增大是女性跑者 PFP 的危险因素,这也可能使女性更易产生 PFP。因此,本文认为,跑步时较大的髌内收角度与 PFP 有关,且这一特征女性相对男性患者更为显著。

本文虽然也发现膝关节最大外展和外旋角度、外展力矩峰值、髌关节最大内旋角度、股内侧肌与股外侧肌激活程度比表现出性别差异,但未发现实验组和对照组间的区别。因此,这些因素并不能作为 PFP 业余跑者所表现出的下肢生物力学特征,但仍可能有助于说明性别间不同的损伤机制。女性膝最大外展和外旋角度、髌最大内旋角度均显著大于男性。由于女性在结构和神经肌肉控制上的特点可能使其 Q 角增大、髌外旋控制能力下降,从而表现出较大的膝外展、外旋角度和髌内旋角度。Lee 等^[24]研究认为,股骨和胫骨在冠状面和水平面上的异常运动会造成髌股关节负荷增大,故造成女性更易产生 PFP。男性膝外展力矩峰值显著大于女性。

Myer 等^[25]研究发现,膝外展力矩可能增加髌骨外侧面的负荷,当其大于 $15.4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,对于预测 PFP 有较强的敏感性和特异性。但也有研究表明,疼痛还可能使患者产生降低膝关节负荷的动作模式^[16]。本文未发现 PFP 业余跑者表现出较大的膝关节力矩和髌股关节应力,也可能与这种疼痛代偿有关。女性股内侧肌与股外侧肌激活程度比小于男性。股四头肌是髌股关节唯一动态稳定结构,尤其是股内侧肌和股外侧肌会对髌骨分别产生向内和向外的分力,两者在激活程度和时间上的不均衡会影响髌骨运动轨迹^[26-27]。女性相比于男性更小的股内侧肌与股外侧肌激活程度比可能导致髌骨外移增大,进一步造成髌股关节接触面积减小、应力增大,从而提高女性出现 PFP 的风险。但 Pal 等^[28]研究认为,只有髌骨倾斜和移动率异常的 PFP 患者才会表现出 EMG 差异,而未依据髌股关节结构特征进行分组也可能是造成当前 EMG 研究结论不一致的原因。

综上所述,针对于不同性别 PFP 业余跑者所表现出的下肢生物力学特征,对于该损伤的治疗应根据性别选择更有针对性的方法。许多 PFP 干预手段的预期效果都是改善膝关节矢状面或髌关节在冠状面和水平面的力学机制,而不同群体的效果反馈可能不同。本文发现,只有男性患者表现出膝关节屈角增大的特征,而女性患者比男性的髌内收角度增大更为显著。因此,在临床治疗中,加入限制膝屈角度的措施可能只对男性患者有效。例如:通过提高步频、降低步长、改变跑步着地方式等跑姿再训练的方法可以减小膝屈角度,并降低髌股关节负荷^[29-30]。而加入改善髌内收角度的措施可能对女性患者更有益。Noehren 等^[31]研究认为,女性髌外展肌群力量薄弱可能是导致髌内收异常的原因,故女性应更加注重对髌外展肌群的神经肌肉控制训练,且干预后髌内收减小 5° 就可以显著改善下肢疼痛和功能。今后研究可依据性别特异的下肢生物力学特征提出 PFP 具体的治疗策略,并进一步检验性别特异的治疗策略对患者下肢功能、疼痛等级和生物力学特征的影响。

4 结论

不同性别的 PFP 业余跑者在跑步缓冲期会表

现出不同的下肢生物力学特征,相比于无损伤业余跑者,男性患者表现出更大的膝屈角度,同时男、女性患者都表现出更大的髌内收角度,但女性显著大于男性。虽然跑步缓冲期膝最大外展和外旋角度、膝外展力矩峰值、髌最大内旋角度、股内与股外侧肌激活程度比均表现出性别差异,但 PFP 和无损伤业余跑者间无显著差异,故不能作为 PFP 业余跑者所表现出的下肢生物力学特征。

针对不同性别 PFP 业余跑者所表现出的不同特征,对于该损伤的治疗应具有性别特异性。临床上,男性患者可采取减小膝屈角度的干预手段,而女性患者可采取减小髌内收角度的干预手段。

参考文献:

- [1] HALABCHI F, MAZAHERI R, SEIF-BARGHI T. Patellofemoral pain syndrome and modifiable intrinsic risk factors: How to assess and address? [J]. *Asian J Sports Med*, 2013, 4(2): 85-100.
- [2] CROSSLEY KM, MIDDELKOOP M, BARTON CJ, et al. Rethinking patellofemoral pain: Prevention, management and long-term consequences [J]. *Best Pract Res Cl Rh*, 2019, 33(1): 48-65.
- [3] THOMAS MJ, WOOD L, SELFE J, et al. Anterior knee pain in younger adults as a precursor to subsequent patellofemoral osteoarthritis: A systematic review [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2010, 11(1): 201-208.
- [4] NEAL BS, LACK SD, LANKHORST NE, et al. Risk factors for patellofemoral pain: A systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Sport Med*, 2019, 53(5): 270-282.
- [5] LANKHORST NE, BIERMA-ZEINSTRASMA, MIDDELKOOP M. Factors associated with patellofemoral pain syndrome: A systematic review [J]. *Br J Sports Med*, 2013, 47(4): 193-206.
- [6] 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 [J]. *Br J Sports Med*, 2018, 52(18): 1170-1178.
- [7] BOLING M, PADUA D, MARSHALL S, et al. Gender differences in the incidence and prevalence of patellofemoral pain syndrome [J]. *Scand J Med Sci Sport*, 2010, 20(5): 725-730.
- [8] SINCLAIR J, SELFE J. Sex differences in knee loading in recreational runners [J]. *J Biomech*, 2015, 48(10): 2171-2175.
- [9] ALMONROEDER TG, BENSON LC. Sex differences in lower extremity kinematics and patellofemoral kinetics during running [J]. *J Sports Sci*, 2016, 35(16): 1-7.
- [10] BOLING MC, NGUYEN A, PADUA DA, et al. Gender-specific risk factor profiles for patellofemoral pain [J]. *Clin J Sport Med*, 2019, doi: 10.1097/JSM.0000000000000719.
- [11] CROSSLEY KM, STEFANIK JJ, SELFE J, et al. 2016 Patellofemoral pain consensus statement from the 4th International Patellofemoral Pain Research Retreat, Manchester. Part 1: Terminology, definitions, clinical examination, natural history, patellofemoral osteoarthritis and patient-reported outcome measures [J]. *Br J Sport Med*, 2016, 50(14): 839-843.
- [12] WILLY RW, MANAL KT, WITVROUW EE, et al. Are mechanics different between male and female runners with patellofemoral pain? [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(11): 2165-2171.
- [13] NISHIJIMA Y, KATO T, YOSHIKAWA M, et al. Application of the segment weight dynamic movement method to the normalization of gait EMG amplitude [J]. *J Electromyogr Kines*, 2010, 20(3): 550-557.
- [14] YU B, GABRIEL D, NOBLE L, et al. Estimate of the optimum cutoff frequency for the Butterworth low-pass digital filter [J]. *J Appl Biomech*, 1999, 15(3): 318-329.
- [15] YU B, QUEEN RM, ABBEY AN, et al. Hamstring muscle kinematics and activation during overground sprinting [J]. *J Biomech*, 2008, 41(15): 3121-3126.
- [16] 杨辰. 基于下肢生物力学特征的髌股关节痛危险因素研究 [D]. 北京: 北京体育大学, 2018.
- [17] WINTER DA. *Biomechanics and motor control of human movement* [M]. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [18] 张百发, 罗冬梅, 周兴龙. 弯道跑对下肢髌股关节应力的影响 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(6): 650-655.
- ZHANG BF, LUO DM, ZHOU XL. The influence of curve running on patellofemoral joint stress [J]. *J Med Biomech*. 2019, 34(6): 650-655.
- [19] WALSH M, BOLING MC, MCGRATH M, et al. Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task [J]. *J Athl Training*, 2012, 47(4): 406-413.
- [20] DRAPER CE, BESIET TF, SANTOS JM, et al. Using real-time MRI to quantify altered joint kinematics in subjects with patellofemoral pain and to evaluate the effects of a patellar brace or sleeve on joint motion [J]. *J Orthop Res*, 2009, 27(5): 571-577.
- [21] WILLSON JD, PETROWITZ I, BUTLER RJ, et al. Male and female gluteal muscle activity and lower extremity kinematics during running [J]. *Clin Biomech*, 2012, 27

- (10): 1052-1057.
- [22] HUBERTI HH, HAYES WC. Patellofemoral contact pressures. The influence of q-angle and tendofemoral contact [J]. J Bone Joint Surg Am, 1984, 66(5): 715-724.
- [23] NOEHERN B, HAMILL J, DAVIS I. Prospective evidence for a hip etiology in patellofemoral pain [J]. Med Sci Sports Exerc, 2013, 45(6): 1120-1124.
- [24] LEE TQ, MORRIS G, CSINTALAN RP. The influence of tibial and femoral rotation on patellofemoral contact area and pressure [J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2003, 33(11): 686-693.
- [25] MYER GD, FORD KR, DI STASI SL, *et al.* High knee abduction moments are common risk factors for patellofemoral pain (PFP) and anterior cruciate ligament (ACL) injury in girls: Is PFP itself a predictor for subsequent ACL injury? [J]. Br J Sports Med, 2014, 49(2): 118-122.
- [26] VAN TIGGELEN D, COWAN S, COOREVITS P, *et al.* Delayed vastus medialis obliquus to vastus lateralis onset timing contributes to the development of patellofemoral pain in previously healthy men: A prospective study [J]. Am J Sports Med, 2009, 37(6): 1099-1105.
- [27] SHERMAN SL, PLACKIS AC, NUELLE CW. Patellofemoral anatomy and biomechanics [J]. Clin Sport Med, 2014, 33(3): 389-401.
- [28] PAL S, DRAPER CE, FREDERICSON M, *et al.* Patellar maltracking correlates with vastus medialis activation delay in patellofemoral pain patients [J]. Am J Sports Med, 2011, 39(3): 590-598.
- [29] LENHART RL, THELEN DG, WILLE CM, *et al.* Increasing running step rate reduces patellofemoral joint forces [J]. Med Sci Sports Exerc, 2014, 46(3): 557-564.
- [30] WILLSON JD, SHARPEE R, MEARDON SA, *et al.* Effects of step length on patellofemoral joint stress in female runners with and without patellofemoral pain [J]. Clin Biomech, 2014, 29(3): 243-247.
- [31] NOEHREN B, SCHOLZ J, DAVIS I. The effect of real-time gait retraining on hip kinematics, pain and function in subjects with patellofemoral pain syndrome [J]. Br J Sport Med, 2011, 45(9): 691-696.