

文章编号: 1004-7220(2023)02-0317-07

# 女性全身关节过度活动患者跳深着陆时 膝关节应力分析

向福荣, 唐圣鑫, 刘鑫鑫, 陈奕凝, 林熙凯, 陈建

(武汉体育学院 国家体育总局体育工程重点实验室, 湖北省运动装备工程技术研究中心, 武汉 430079)

**摘要:**目的 分析全身关节过度活动(generalized joint hypermobility, GJH)女性患者与健康女性在跳深着陆中膝关节软骨、半月板 von Mises 应力分布差异。方法 采集女性 GJH 患者与女性健康受试者在跳深着陆缓冲阶段垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, VGRF)峰值时刻的膝关节运动学与地面反作用力特征,通过逆动力学计算膝关节反作用力,并将膝关节沿股骨长轴方向的合力作为载荷;基于1名女性膝关节三维有限元模型,分别对2组受试者跳深着陆过程进行数值仿真,计算膝关节软骨与半月板 von Mises 应力及应力分布。结果 在跳深着陆 VGRF 峰值时刻,GJH 组和对照组膝关节屈曲、外翻角度具有统计学意义( $P<0.05$ )。相比于对照组,GJH 组膝关节屈曲角度降低、外翻角度增加;在跳深着陆中,GJH 组膝关节内部承受应力更大且胫股关节内、外侧室负重区应力分布不均衡,其股骨软骨外侧髁外侧、外侧胫骨软骨前部/中部外侧以及外侧半月板前角、体部外侧缘为应力集中部位。结论 女性 GJH 患者因膝关节活动范围增大、关节囊松弛,导致在跳跃类项目中膝关节稳定性降低、关节力线发生改变,从而使膝关节外侧软骨与半月板损伤风险增加;在跳跃运动中,GJH 女性患者尤其要防止膝关节额状面力线改变造成膝关节的损伤。

**关键词:** 全身关节过度活动; 膝关节软骨; 半月板; 跳深着陆; 运动学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.02.017

## Analysis of Knee Joint Stress During Drop Jump Landing in Females with Generalised Joint Hypermobility

XIANG Furong, TANG Shengxin, LIU Xinxin, CHEN Yining, LIN Xikai, CHEN Jian

(Research Center of Sports Equipment Engineering Technology of Hubei Province, Key Laboratory of Sports Engineering, General Administration of Sports of China, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** **Objective** To analyze the differences of von Mises stress distribution in knee cartilage and meniscus in female with generalised joint hypermobility (GJH) and healthy female during drop jump landing. **Methods** The kinematic and ground reaction force (GRF) characteristics of knee joint in female with GJH and healthy female at the moment of peak vertical GRF (VGRF) during loading phase of drop jump landing were collected. The knee joint reaction force was calculated via inverse dynamics, and the combined force of knee joint along long axis of the femur was applied as the load. Based on three-dimensional (3D) finite element model of a female knee joint, numerical simulations were performed separately during drop jump landing of subjects in two groups, and von Mises stresses and stress distribution of knee cartilage and meniscus were calculated. **Results** At the moment of

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-04-08

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划项目(B2021193)

通信作者: 陈建, 副教授, E-mail: 57277028@qq.com

peak VGRF during drop jump landing, knee flexion and valgus angles in GJH group and control group showed a statistical significance ( $P < 0.05$ ). Compared with control group, knee flexion angle decreased and valgus angle increased in GJH group. During drop jump landing, GJH group bore larger stress inside the knee joint, and stress distribution in weight-bearing areas of the medial and lateral tibiofemoral compartments was uneven, while the lateral femoral cartilage lateral condyle, the anterior and middle lateral of lateral tibial cartilage, the anterior angle and body lateral margin of lateral meniscus were stress concentration sites. **Conclusions** For females with GJH, the stability of knee joint decreases and force lines change in jumping events, due to the increased range of motion of knee joint and relaxation of joint capsule, which increases the risk of cartilage and meniscal injury in lateral knee joint. During jumping sports, females with GJH should especially prevent knee joint injury caused by altered force lines in frontal plane of knee joint.

**Key words:** generalized joint hypermobility (GJH); knee cartilage; meniscus; drop jump landing; kinematics

全身关节过度活动 (generalized joint hypermobility, GJH) 是指身体大多数滑膜关节活动范围 (range of motion, ROM) 超过正常 ROM。关节 ROM 改变与性别、年龄、种族及外伤等因素相关, 患有 GJH 人群的特征是关节囊松弛, 关节 ROM 增大, 但无其他肌肉疲劳、疼痛、关节脱位等伴随症状<sup>[1-2]</sup>。GJH 在成人中的患病率为 2% ~ 57%。其中, GJH 在女性和儿童中的患病率更高, 且女性患病率是男性的 3 倍<sup>[3-4]</sup>。

GJH 诊断常基于临床症状分析, 包括 Cater、Wikinson、Marshall 测试以及 Beighton 评分<sup>[4]</sup>。其中, 最常用的是 Beighton 评分。根据最新划分标准, Beighton 评分 5/9 对青春期末至 50 岁以下人群进行诊断具有良好的组内信度和组间信度<sup>[5]</sup>。

由于 GJH 患者关节 ROM 增大, 使其在日常生活及运动中关节处于不正常的对位对线, 改变了关节的运动学、动力学与肌肉电生理学的特征<sup>[6-8]</sup>。有研究认为, GJH 患者膝关节运动学、动力学、肌肉电生理学特征改变可能会导致关节重复使用而出现代偿性变化, 从而增加关节表面与内部结构的应力<sup>[9-11]</sup>。此外, 也有研究表明, GJH 可能与前交叉韧带损伤、骨性关节炎等疾病相关<sup>[7, 12-13]</sup>。但 Juul-Kristensen 等<sup>[14]</sup>研究发现, GJH 患者在跳跃中力量增长率峰值更快, 以此增加关节的稳定性; Hanzlíková 等<sup>[15]</sup>的研究并没有发现 GJH 患者在跳跃运动中有与前交叉韧带损伤的相关高风险动作。

目前对于 GJH 的研究主要集中在电生理学及运动生物力学特征上, 且研究结果尚未统一。此外, 膝关节内部结构的具体特征尚不明确。日常运

动过程中常会经历跳跃落地, 而 GJH 患者可能因膝关节过度活动而增加关节承受应力, 从而造成损伤。本文基于运动学与逆动力学计算结果, 采用膝关节三维有限元模型, 分析在跳深着陆中女性 GJH 患者与女性健康人群的膝关节应力分布差异。研究结果将进一步明确女性 GJH 患者在运动中膝关节内部应力特征, 为女性 GJH 患者在运动中防止膝关节损伤以及损伤后的康复提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

招募 14 名女性 GJH 患者作为实验组, 身高 ( $1.64 \pm 0.03$ ) m, 体重 ( $54.28 \pm 3.12$ ) kg, 年龄 ( $20.28 \pm 1.38$ ) 岁。同时, 匹配 14 名与 GJH 患者相似的健康女性作为对照组, 身高 ( $1.63 \pm 0.04$ ) m, 体重 ( $55.14 \pm 4.01$ ) kg, 年龄 ( $20.59 \pm 1.59$ ) 岁。对受试者进行跳深着陆测试。纳入标准: GJH 组 Beighton 评分  $\geq 5$  分, 且至少一侧膝关节过伸超过  $10^\circ$ ; 对照组 Beighton 评分  $\leq 1$  分, 且无膝关节过伸<sup>[8]</sup>, 近半年无严重下肢损伤。排除标准: 有明显腿部畸形, 如 X 型腿、O 型腿; 诊断为遗传性疾病, 如 Marfan 综合征、Ehler-Danlos 综合征 I 型或 II 型等。Beighton 评分标准见表 1。

### 1.2 数据采集与处理

采用 Vicon 三维运动捕捉系统 (采样频率 250 Hz, Oxford Metrics Limited 公司, 英国) 和 Kistler 三维测力台 (采样频率 1 kHz, Kistler 公司, 瑞士), 完成原始运动学和地面反作用力数据采集。在测试前进行 5 min 热身活动, 热身结束后进行 3~5 次

表1 Beighton 评分标准

Tab.1 Standard of Beighton score

动作	无	一侧	双侧
第5掌指关节被动背屈 $\geq 90^\circ$	0	1	2
大拇指伸直时能被动贴向前臂屈侧	0	1	2
膝关节被动过伸 $\geq 10^\circ$	0	1	2
肘关节被动过伸 $\geq 10^\circ$	0	1	2
站立体前屈,手掌轻松地落于地面上	0	1	

跳深着陆以熟悉动作。测试前,为受试者粘贴好38个直径14 mm的红外反光点,完成对下肢节段的定义<sup>[16]</sup>。粘贴好红外反光点后,受试者完成跳深着陆<sup>[17]</sup>。步骤要求如下:①受试者站在高30 cm的箱子上,箱子与力台的距离为受试者身高50%;②受试者听到指令后双脚同时向力台中心跳跃;③落地后立即进行原地纵跳(见图2)。为避免受试者疲劳,每次动作测试中间停顿1 min,总共采集3次有效数据取平均值。数据处理采用Visual 3D(C-Motion公司,美国)分析软件对原始数据进行低通滤波和逆动力学计算,运动学、动力学数据截止频率分别为15、50 Hz。

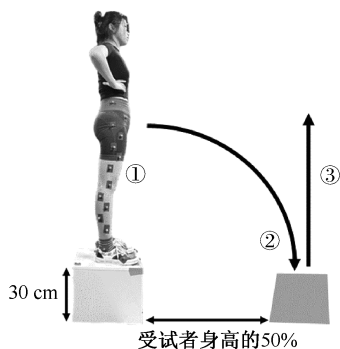


图1 跳深着陆动作

Fig.1 Drop jump landing

### 1.3 膝关节三维有限元模型构建

选取1名健康成年女性为研究对象,年龄22岁、身高165 cm、体重54 kg。在中国人民解放军中部战区总医院行CT和MRI检查排除膝关节损伤、退变、疾病、畸形等。采用层厚1 mm的MRI扫描,层厚0.5 mm的CT扫描,获取膝关节屈曲 $36^\circ$ 、外翻 $3.6^\circ$ 三维图像。将扫描数据以DICOM格式导入Mimics 21.0重建三维几何模型;在Geomagic 2017中进行表面优化及曲面拟合处理;在SolidWorks 2017进行模型装配,模型包括股骨、胫骨、髌骨、腓骨、股骨软骨、胫骨软骨、腓骨软骨、半月板、前后交叉韧带、内外侧副韧带及髌腱;最后在ANSYS 17.0中完成网格划分、定义材料属性。

设定骨材料类型为刚体,弹性模量11 GPa、泊松比0.3;半月板和软骨为各向同性线弹性材料;半月板弹性模量59 MPa、泊松比0.49;软骨弹性模量5 MPa、泊松比0.46<sup>[18-19]</sup>。由于韧带在跳跃的过程中变形较为显著,故韧带采用超弹性材料。模型的韧带材料属性参数见表2。本文选用Neo-Hooke模型<sup>[20-21]</sup>,Neo-Hooke函数如下:

$$\Psi = \frac{1}{2D} \ln(I)^2 + C_1(I - 3) + F_2(\gamma)$$

表2 膝关节韧带材料参数

Tab.2 Material parameters of knee ligament

韧带	$C_1$ /MPa	$D$
前交叉韧带	1.95	0.006 83
后交叉韧带	3.25	0.004 10
内侧副韧带	1.44	0.001 26
外侧副韧带	1.44	0.001 26
髌韧带	2.75	0.004 84

注: $C_1$ 为Neo-Hooke常数; $1/D$ 为体积模量。

设置软骨与骨、韧带起止与骨相接触的部位以及半月板前后角与胫骨平台之间为绑定接触;膝关节内部结构如半月板与软骨、韧带相接触部位为无摩擦接触;骨、软骨、韧带、半月板均采用四面体与六面体混合划分,划分单元格尺寸为3 mm。

### 1.4 设定边界条件及加载载荷

研究表明,膝关节损伤多发生在跳深着陆中的落地缓冲期垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, VGRF)峰值时刻<sup>[22-24]</sup>。因此,本文主要分析缓冲期VGRF峰值时刻膝关节应力分布。获取VGRF峰值时刻GJH组与对照组膝关节运动学数据

作为边界条件,定义胫骨、腓骨完全固定,股骨的自由度不受约束;以膝关节反作用力计算出膝关节沿股骨长轴方向的合力作为载荷代入 ANSYS 17.0 软件中,计算膝关节模型的应力分布情况。

## 2 结果

### 2.1 膝关节有限元模型有效性验证结果

为了验证膝关节有限元模型的有效性,将膝关节模型调整为屈曲  $30^\circ$ , 设置与 He 等<sup>[25]</sup> 相同的材料属性、网格划分、接触及边界条件,在股骨上施加 350 N 垂直于胫骨平台的轴向载荷,得到内、外侧半月板最大 von Mises 应力分别为 6.52、6.65 MPa。该结果与 He 等<sup>[25]</sup> 的研究相似[内、外侧半月板应力为分别为  $(6.41 \pm 0.18)$ 、 $(6.92 \pm 0.06)$  MPa]。半月板 von Mises 应力验证了本研究膝关节有限元模型的有效性,可进行下一步研究。

### 2.2 VGRF 峰值时刻膝关节运动学、动力学特征

应用 Vicon 三维运动捕捉系统与 Kistler 三维测力台,获取 2 组受试者在跳深着陆缓冲阶段 VGRF 峰值时刻的膝关节三维运动学特征。采用独立样本 *t* 检验对 2 组间的膝关节运动学数据进行分析。结果显示,在 VGRF 峰值时刻,GJH 组与对照组膝关节外旋角度差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),膝关节屈曲、外翻角度组间差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ),见表 3。该结果表明,在 VGRF 峰值时刻,相比于对照组,GJH 组膝关节屈曲角度降低,外翻角度增加,膝关节受伤风险增加。

表 3 VGRF 峰值时刻膝关节运动学特征

Tab. 3 Kinematic characteristics of knee joint at the moment of peak VGRF 单位:( $^\circ$ )

指标	GJH 组	对照组
膝屈曲/伸展角度	$-36.47 \pm 7.06^*$	$-41.60 \pm 5.59$
膝内翻/外翻角度	$-3.62 \pm 3.99^*$	$-1.44 \pm 3.35$
膝内旋/外旋角度	$-0.06 \pm 4.83$	$-1.03 \pm 6.05$

注:膝关节伸展为正、屈曲为负;膝关节内翻为正、外翻为负;膝关节内旋为正、外旋为负。 $*P < 0.05$ 。

应用 Vicon 三维运动捕捉系统与 Kister 三维测力台,获取 2 组受试者在跳深着陆缓冲阶段 VGRF 峰值时刻膝关节沿股骨长轴方向的合力。结果显示,在 VGRF 峰值时刻,GJH 组、对照组股骨长轴方向的合力分别为 1 511、1 079 N,差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),见表 4。

表 4 VGRF 峰值时刻膝关节动力学特征( $*P < 0.05$ )

Tab. 4 Kinetic characteristics of knee joint at the moment of peak VGRF 单位:N

指标	GJH 组	对照组
VGRF 峰值	$1\ 367.78 \pm 199.52^*$	$1\ 090.33 \pm 250.48$
股骨长轴方向的合力	1 511	1 079

### 2.3 膝关节内部应力分布特征

2 组受试者在跳深着陆缓冲阶段 VGRF 峰值时刻膝关节 von Mises 应力及应力分布的特征如下:

GJH 组股骨软骨 von Mises 峰值应力为 4.89 MPa,主要集中在股骨软骨外侧髁的外侧部,其他部位应力分布较为均匀,主要分布在与半月板相互接触的部位;对照组与 GJH 组股骨软骨应力分布相似,但峰值应力分布集中在股骨软骨外侧髁的内侧部,其峰值应力为 2.80 MPa[见图 2(a)]。

GJH 组胫骨软骨 von Mises 峰值应力为 9.21 MPa,应力主要集中在外侧胫骨软骨前部与中部外侧,且前部与中部为主要应力承受部位,后部承受应力较小;内侧胫骨软骨应力分布比较均匀,应力主要分布在内侧胫骨软骨中部外侧与后部,前部承受应力较小。对照组胫骨软骨 von Mises 峰值应力为 4.15 MPa,应力主要集中在外侧胫骨软骨中部内侧,胫骨软骨前部与中部为应力承受主要部位;内侧胫骨软骨应力分布与 GJH 组相似[见图 2(b)]。

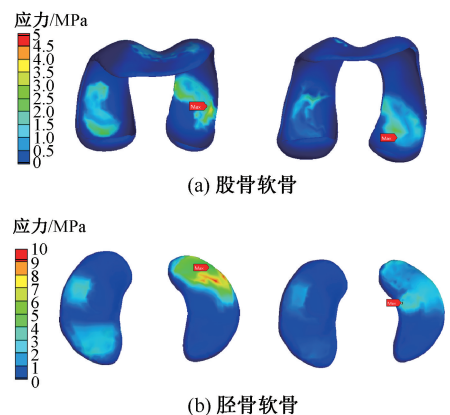


图 2 VGRF 峰值时刻膝关节软骨 von Mises 应力分布

Fig. 2 Von Mises stress distributions of knee cartilage at the moment of peak VGRF (a) Femoral cartilage, (b) Tibial cartilage

GJH 组双侧半月板 von Mises 峰值应力为 10.87 MPa,主要集中在外侧半月板体部外侧缘,且外侧半月板前角、体部为应力承受主要部位,而半月板后角承受应力较小;内侧半月板应力分布主要



集中在半月板体部和后角,其中内侧半月板体部与后角内侧缘承受应力较大,而半月板前角承受应力较小。对照组半月板 von Mises 峰值应力为 6.77 MPa,主要分布在外侧半月板体部内侧缘,与 GJH 组应力分布相似,外侧半月板前角、体部为应力主要承受部位,而半月板后角承受应力较小;内侧半月板的应力分布主要集中在半月板体部和后角,且内侧半月板体部与后角内侧缘承受应力较大,峰值应力达到 5.41 MPa(见图 3)。

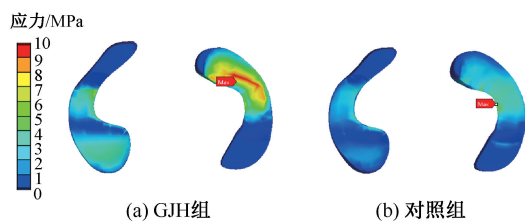


图 3 VGRF 峰值时刻膝关节双侧半月板 von Mises 应力分布

Fig. 3 Von Mises stress distributions on bilateral meniscus of knee joint at the moment of peak VGRF (a) GJH group, (b) Control group

### 3 讨论

了解女性 GJH 患者在运动中膝关节的损伤风险,对于帮助女性 GJH 患者在运动中预防膝关节损伤至关重要。在跳深着陆中,膝关节所承受的反作用力是导致其损伤的一个重要因素。本文获取跳深着陆缓冲阶段 VGRF 峰值时刻膝关节三维运动角度与膝关节反作用力,并且将沿股骨长轴方向的合力作为有限元施加的载荷,计算获取在跳深着陆中女性 GJH 患者膝关节的应力分布特征。

目前基于女性 GJH 膝关节损伤的研究,有学者采用运动学、动力学及神经电生理学变化预测 GJH 患者膝关节软骨损伤。Simonsen 等<sup>[9]</sup>研究发现,患有 GJH 人群在行走过程中膝关节外展力矩增加,而且其外展力矩每增加 1%,其骨关节炎的患病率增加 6.46 倍。Juul-Kristensen 等<sup>[10]</sup>与 Jensen 等<sup>[11]</sup>分别在平衡和等速肌力测试任务中发现,GJH 患者膝关节内侧肌群相比外侧肌群激活程度更高,膝关节长期承受内外侧不对称的载荷会造成 GJH 患者患内侧膝骨关节炎的风险增加。本文发现,在跳深着陆中,GJH 组与对照组膝关节应力分布有所差别,

GJH 组股骨软骨、胫骨软骨承受应力更高,导致患骨性关节炎的风险增加。但与 Juul-Kristensen 等<sup>[10]</sup>、Jensen 等<sup>[11]</sup>预测结果略有差别,本文结果表明,GJH 患者股骨关节外侧室软骨接触部比内侧室软骨接触部承受应力更高,其股骨软骨外侧髁、外侧胫骨软骨的负重区域为应力承受集中部位,在长期不对称的应力分布下会造成患外侧膝骨关节炎的风险增加。推测原因如下:本文采取的动作为跳深着陆,与平衡和等速肌力测试任务相比难度更高、动作更为复杂,GJH 患者在落地缓冲时,膝关节额平面外翻角度增加,下肢关节力线发生偏移,此时下肢动作链的姿势为大腿内收、小腿外展,导致膝关节外侧软骨承受应力增加。同时, Juul-Kristensen 等<sup>[10]</sup>、Jensen 等<sup>[11]</sup>通过神经电生理、动力学等数据间接推测 GJH 患者膝关节内部应力分布,而本文直接通过影像学数据建立膝关节实体模型获取膝关节内部应力分布特征。此外,本文选取膝关节最容易损伤且最具有特征性的 VGRF 峰值时刻进行分析,但膝关节应力分析仅为 1 个时刻,可能是造成数据有所差异的原因。

本文发现,GJH 组和对照组峰值应力均分布在膝关节外侧软骨与外侧半月板的负重区,这与杨远等<sup>[26]</sup>分析研究一致,膝关节运动性损伤外侧高于内侧。但与对照组相比,GJH 组股骨软骨峰值应力分布在股骨软骨外侧髁的外侧部,胫骨软骨峰值应力分布在外侧胫骨软骨前部、中部的内侧,半月板的峰值应力也集中于外侧半月板的前角与体部外侧缘;而对照组股骨软骨峰值应力分布在股骨软骨外侧髁的内侧部,胫骨软骨峰值应力分布在外侧胫骨软骨中部偏内侧,半月板的峰值应力集中于外侧半月板的前角与体部内侧缘和内侧半月板内侧缘。与对照组相比,GJH 组的膝关节软骨与半月板承受峰值应力更大且整体向外侧分布,这可能与两者的落地模式有关。GJH 女性因关节过度活动,关节囊松弛,在运动中神经肌肉无法控制关节的动态稳定性,在缓冲落地时,膝关节矢状面屈曲角度小于对照组,GJH 组以更加直立的姿势落地,造成落地时地面反作用力、膝关节反作用力增加,导致膝关节内部应力增加。此外,与对照组相比,GJH 患者在额状面采用膝关节外翻姿势缓冲,造成膝关节峰值应力分布更偏向外侧缘。

本文仅分析 VGRF 峰值时刻女性 GJH 患者膝关节内部应力特征,而未采取跳深着陆中多个时刻、多个阶段进行分析,未来研究可在跳深着陆及其他动作中的不同阶段、不同时刻对 GJH 患者膝关节内部应力进行深入分析,并积极探索预防和治疗的方法,为 GJH 患者预防和治疗膝关节损伤提供有效的方法。

## 4 结论

在跳深着陆缓冲阶段 VGRF 峰值时刻,女性 GJH 患者采用更加直立、外翻的姿势进行落地缓冲,在跳跃类项目中可能会增加股骨软骨外侧髁的外侧部,外侧胫骨软骨前部、中部外侧,外侧半月板前角、体部外侧缘等胫股关节外侧室软骨与半月板负重区域的损伤风险。GJH 女性患者在日常生活中不仅要注意预防运动损伤,而且要加强正确的体育锻炼,增强肌力、本体感觉、平衡能力等,提高关节的稳定性,在跳跃运动中,尤其要防止因膝关节额状平面的外翻过度造成的关节损伤。

## 参考文献:

- [ 1 ] WOLF JM, CAMERON KL, OWENS BD. Impact of joint laxity and hypermobility on the musculoskeletal system [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2011, 19(8): 463-471.
- [ 2 ] CASTORI M, COLOMBI M. Generalized joint hypermobility, joint hypermobility syndrome and Ehlers-Danlos syndrome, hypermobility type [J]. *Am J Med Genet C Semin Med Genet*, 2015, 169C(1): 1-5.
- [ 3 ] CLINCH J, DEERE K, SAYERS A, *et al.* Epidemiology of generalized joint laxity (hypermobility) in fourteen-year-old children from the UK: A population-based evaluation [J]. *Arthritis Rheum*, 2011, 63(9): 2819-2827.
- [ 4 ] EWERTOWSKA P, TRZASKOMA Z, SITARSKI D, *et al.* Muscle strength, muscle power and body composition in college-aged young women and men with generalized joint hypermobility [J]. *PLoS One*, 2020, 15(7): e0236266.
- [ 5 ] MALFAIT F, FRANCOMANO C, BYERS P, *et al.* The 2017 international classification of the Ehlers-Danlos syndromes [J]. *Am J Med Genet C Semin Med Genet*, 2017, 175(1): 8-26.
- [ 6 ] 钟国庆, 曾小龙, 谢宇, 等. 全身关节过度活动患者步行时膝关节步态图特征[J]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2020, 14(1): 33-39.
- [ 7 ] SHULTZ SJ, SCHMITZ RJ, NGUYEN AD, *et al.* Joint laxity is related to lower extremity energetics during a drop jump landing [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42(4): 771-780.
- [ 8 ] JUNGE T, WEDDERKOPP N, THORLUND JB, *et al.* Altered knee joint neuromuscular control during landing from a jump in 10-15 year old children with generalised joint hypermobility. A substudy of the CHAMPS-study Denmark [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2015, 25(3): 501-507.
- [ 9 ] SIMONSEN EB, TEGNER H, ALKJAER T, *et al.* Gait analysis of adults with generalised joint hypermobility [J]. *Clin Biomech*, 2012, 27(6): 573-577.
- [ 10 ] JUUL-KRISTENSEN B, JOHANSEN K, HENDRIKSEN P, *et al.* Girls with generalized joint hypermobility display changed muscle activity and postural sway during static balance tasks [J]. *Scand J Rheumatol*, 2016, 45(1): 57-65.
- [ 11 ] JENSEN BR, SANDFELD J, MELCHER PS, *et al.* Alterations in neuromuscular function in girls with generalized joint hypermobility [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2016, 17(1): 410.
- [ 12 ] STETTLER M, LUDER G, SCHMID S, *et al.* Passive anterior tibial translation in women with and without joint hypermobility: An exploratory study [J]. *Int J Rheum Dis*, 2018, 21(10): 1756-1762.
- [ 13 ] GÜLCAN G, TASCI BG, TIRAJE T, *et al.* Frequency of joint hypermobility in Turkish patients with knee osteoarthritis: A cross sectional multicenter study [J]. *Int J Rheum Dis*, 2018, 21(S1): 1787-1792.
- [ 14 ] JUUL-KRISTENSEN B, HANSEN H, SIMONSEN EB, *et al.* Knee function in 10-year-old children and adults with generalised joint hypermobility [J]. *Knee*, 2012, 19(6): 773-778.
- [ 15 ] HANZLÍKOVÁ I, HÉBERT-LOSIER K. Do asymptomatic generalised hypermobility and knee hyperextension influence jump landing biomechanics? [J]. *Eur J Physiother*, 2020, 23(5): 362-367.
- [ 16 ] 潘正晔, 马勇, 耿治中, 等. 预期条件下不同侧切角度膝关节应力状态的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 762-768.
- [ 17 ] PAN ZY, MA Y, GENG ZZ, *et al.* Finite element analysis on stress state of knee joint with different lateral cutting angles under expected conditions [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 762-768.
- [ 18 ] CRUZ A, BELL D, MCGRATH M, *et al.* The effects of three jump landing tasks on kinetic and kinematic measures: Implications for ACL injury research [J]. *Res Sports Med*, 2013, 21(4): 330-342.
- [ 19 ] MAKINEJAD MD, OSMAN NA, ABAS WA, *et al.* Preliminary analysis of knee stress in full extension landing [J]. *Clinics*, 2013, 68(9): 1180-1188.

- [19] UGUR L. Comparison of reaction forces on the anterior cruciate and anterolateral ligaments during internal rotation and anterior drawer forces at different flexion angles of the knee joint [J]. *Int J Med Robot*, 2017, 13(4): 1815-1821.
- [20] PENA E, CALVO B, MARTINEZ MA, *et al.* A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint [J]. *J Biomech*, 2006, 39(9): 1686-1701.
- [21] ZHENG KK, CHEN JN, SCHOLEC C, *et al.* Magnetic resonance imaging (MRI) based finite element modeling for analyzing the influence of material properties on menisci responses [J]. *Appl Mech Mater*, 2014, 553: 305-309.
- [22] HOLDEN S, DOHERTY C, BOREHAM C, *et al.* Sex differences in sagittal plane control emerge during adolescent growth: A prospective investigation [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(2): 419-426.
- [23] PEEBLES AT, DICKERSON LC, RENNER KE, *et al.* Sex-based differences in landing mechanics vary between the drop vertical jump and stop jump [J]. *J Biomech*, 2020, 105: 109818.
- [24] 苏玉林, 李翰君, 于冰, 等. 前交叉韧带易伤动作的下肢运动生物力学分析[J]. *体育学刊*, 2009, 16(8): 96-101.
- [25] HE C, HE W, LI Y, *et al.* Biomechanics of knee joints after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Knee Surg*, 2018, 31(4): 352-358.
- [26] 杨远, 张凯搏, 付维力, 等. 系统评价运动性半月板损伤的流行病学特征[J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(31): 5079-5084.

(上接第 302 页)

- XU HY, ZHANG P, JIANG LY. Effects of microenvironment on osteogenesis of bone marrow mesenchymal stem cells through cytoskeleton tension [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(6): 668-672.
- [19] SUMREIN BO, HUTTUNEN TT, LAUNONEN AP, *et al.* Proximal humeral fractures in Sweden: A registry-based study [J]. *Osteoporos Int*, 2017, 28(3): 901-907.
- [20] LI XT, SHEN XT, WU X, *et al.* A novel transverse ultrasonography technique for minimally displaced lateral humeral condyle fractures in children [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2019, 105(3): 557-562.
- [21] LI XT, SHEN XT, WU X, *et al.* Impact of transverse ultrasound images on the classification and treatment of pediatric lateral humeral condyle fractures [J]. *J Pediatr Orthop*, 2020, 40(4): e287-e292.
- [22] 周治国, 雷渊学, 李俊, 等. 超声引导下闭合复位联合外固定架治疗青少年及儿童肱骨近端骨折 [J]. *骨科*, 2021, 12(5): 435-439.
- [23] 赵波, 冉霞, 张铭华, 等. 自制克氏针钩固定治疗严重移位儿童肱骨近端骨折[J]. *中国骨伤*, 2014, 27(7): 579-582.
- [24] CANAVESE F, MARENGO L, SAMBA A, *et al.* Evaluation of upper extremity function of displaced diaphyseal humeral fractures in children treated by elastic stable intramedullary nailing: Preliminary results [J]. *J Pediatr Orthop*, 2016, 25(5): 399-405.
- [25] LI M, WANG Y, ZHANG Y, *et al.* Intramedullary nail versus locking plate for treatment of proximal humeral fractures: A meta-analysis based on 1384 individuals [J]. *J Int Med Res*, 2018, 46(11): 4363-4376.