

不同运动贴扎技术对跳深着陆时膝关节应力的影响

向福荣, 唐圣鑫, 欧丽珍, 林熙凯, 陈建

<https://doi.org/10.12307/2023.810>

投稿日期: 2022-09-19

采用日期: 2022-11-10

修回日期: 2022-12-31

在线日期: 2023-01-19

中图分类号:

R496; R311; R873.1

文章编号:

2095-4344(2023)30-04850-06

文献标识码: B

文章快速阅读: 有限元分析不同贴扎技术对篮球运动者膝关节应力的影响

在跳深运动中, 获取女性篮球运动者在无贴扎、肌内效贴扎、重弹贴扎后的膝关节三维生物力学数据。

基于一名女性受试者的CT、MRI片建立膝关节三维有限元模型。

在跳跃运动中, 可用贴扎改善膝关节额状面与水平面的控制能力, 降低膝关节内部应力, 提高运动表现能力。

以垂直地面反作用力峰值时刻的膝关节三维生物力学数据作为边界条件和载荷, 进行有限元仿真。

文题释义:

膝关节应力分析: 采用Mimics、Geomagic、Solidworks、Ansys等软件建立膝关节仿真模型, 以跳深运动中膝关节运动学和动力学指标作为载荷和边界条件, 计算膝关节软骨、半月板、前交叉韧带的应力分布情况。

跳深动作: 从三维运动生物力学角度分析落地时的缓冲姿势, 从而判断膝关节运动损伤的风险, 是常见的膝关节运动损伤评估方法。

摘要

背景: 贴扎作为一种有效预防运动过程中损伤的方法已得到广泛应用, 但采用不同的贴扎方式对膝关节内部应力的影响尚不清晰。

目的: 分析不同类型贴扎在跳深着陆中对女性篮球运动者膝关节运动学、动力学和软骨、半月板、前交叉韧带应力分布差异的影响。

方法: ①招募10名武汉体育学院篮球专项女大学生, 身高(166.60±1.64) cm, 体质量(57.50±2.87) kg, 年龄(22.40±1.77)岁。每名受试者分别在膝关节无贴扎、肌内效贴扎、重弹贴扎的条件下进行跳跃动作, 采集跳深着陆时膝关节运动学与地面反作用力数据。②基于膝关节三维有限元模型, 以垂直地面反作用力峰值时刻膝关节运动学数据作为边界条件, 以股骨长轴方向的合力作为载荷, 分析跳深着陆过程中膝关节模型的应力分布情况。

结果与结论: ①收集受试者跳深着陆数据显示, 无贴扎组、肌内效贴扎组触地时刻膝关节外翻角度大于重弹贴扎组($P < 0.05$); 无贴扎组垂直地面反作用力峰值时刻膝关节膝外翻角度大于肌内效贴扎组、重弹贴扎组($P < 0.05$), 缓冲阶段峰值膝关节膝外翻角度均大于肌内效贴扎组、重弹贴扎组($P < 0.05$); 缓冲阶段峰值膝关节内翻角度小于肌内效贴扎、重弹贴扎组($P < 0.05$); 无贴扎组、肌内效贴扎组缓冲阶段峰值膝关节内旋角大于重弹贴扎组($P < 0.05$); ②有限元模型分析结果显示, 无贴扎组股骨软骨外侧髁中部、外侧胫骨软骨中部与外侧半月板前角内侧缘为应力集中部位; 肌内效贴扎组股骨软骨外侧髁中部, 重弹贴扎组股骨软骨内侧髁中部及肌内效贴和重弹贴扎组内侧胫骨软骨中部外侧、内侧半月板体部内侧缘为应力集中部位; ③结果显示, 肌内效贴扎与重弹贴扎均能改善落地缓冲时膝关节额状面的运动模式, 减少膝关节外侧软骨及前交叉韧带股骨止点处的应力, 而且重弹贴扎对于改善膝关节水平面内旋角度也有一定的作用, 在运动中膝关节额状面与水平面控制能力较差的人群可采用贴扎的方式, 以提高落地缓冲时膝关节的动态控制能力, 保护膝关节免受损伤。

关键词: 肌内效贴; 膝关节; 有限元分析; 贴扎技术; 篮球运动员; 女性

Effects of different taping methods on knee joint stress during drop jump landing

Xiang Furong, Tang Shengxin, Ou Lizhen, 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, Hubei Province, China

Xiang Furong, Master candidate, 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, Hubei Province, China

Corresponding author: Chen Jian, MD, Associate professor, 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, Hubei Province, China

Abstract

BACKGROUND: As an effective protection method, taping has been widely used; however, the influence of different taping methods on the internal stress of the knee joint is not clear.

OBJECTIVE: To analyze the effect of different kinds of taping on knee kinematics, dynamics and the stress distribution of cartilage, meniscus and anterior cruciate ligament during prevention of drop jump landing in female basketball players.

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, 湖北省武汉市 430079

第一作者: 向福荣, 女, 1995年生, 湖北省恩施市人, 土家族, 在读硕士, 主要从事运动损伤研究与康复研究。

通讯作者: 陈建, 博士, 副教授, 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, 湖北省武汉市 430079

<https://orcid.org/0000-0001-5262-274X>(向福荣)

基金资助: 湖北省教育厅科学研究计划项目(B2021193), 项目负责人: 陈建

引用本文: 向福荣, 唐圣鑫, 欧丽珍, 林熙凯, 陈建. 不同运动贴扎技术对跳深着陆时膝关节应力的影响[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(30):4850-4855.



METHODS: (1) Ten female basketball majors from Wuhan Sports University were recruited, with a height of (166.60±1.64) cm, a body mass of (57.50±2.87) kg and a mean age of (22.40±1.77) years. The knee joint kinematics and ground reaction forces data were collected in participants without taping, with kinesio taping and elastic adhesive taping during drop jump landing. (2) The stress distribution of knee joint model was analyzed, which was based on the three-dimensional finite element model of the knee joint, the kinematic data of knee joint at peak vertical ground reaction force as the boundary condition and the resultant force in the long axis direction of the femur as the load.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Drop jump landing data exhibited that knee valgus angles in non-taping and kinesio taping groups were larger than that in the elastic adhesive taping group when hitting the ground ($P < 0.05$). The knee valgus angles were larger in the non-taping group than that in the kinesio taping and elastic adhesive taping groups at the peak vertical ground reaction force ($P < 0.05$). The knee valgus angles were larger in the non-taping group than that in the kinesio taping and elastic adhesive taping groups in the buffering period ($P < 0.05$). The peak knee varus angle of non-taping group was smaller than that in the kinesio taping and elastic adhesive taping groups in the buffering period ($P < 0.05$). The peak internal rotation angle of the knee joint was larger in the non-taping and kinesio taping groups than that in the elastic adhesive taping group ($P < 0.05$). (2) Finite element model analysis results displayed that stress concentration was located in the middle of lateral condyle of femoral cartilage and lateral tibial cartilage, the medial margin of anterior horn of lateral meniscus in non-taping group. The middle of lateral condyle of femoral cartilage in the kinesio taping group, medial condyle of femoral cartilage in the elastic adhesive taping group, medial lateral part of medial tibial cartilage and medial margin of medial meniscus body in the kinesio taping and elastic adhesive taping groups were the stress concentration sites. (3) These results exhibited that the kinesio taping and elastic adhesive taping can reduce the sport mode of the frontal plane of the knee joint during landing buffering and decrease the stress on the lateral cartilage of the knee joint, the meniscus, and the femoral insertion of the anterior cruciate ligament. Furthermore, the elastic adhesive taping has a certain effect on promoting the horizontal internal rotation angle of knee joint. People with poor control of the frontal plane of the joint can use taping to improve the dynamic control of the knee joint during landing buffering and prevent the knee joint from injury.

Key words: kinesio taping; knee joint; finite element analysis; taping technology; basketball player; female

Funding: Scientific Research Program of Hubei Provincial Department of Education, No. B2021193 (to CJ)

How to cite this article: XIANG FR, TANG SX, OU LZ, LIN XK, CHEN J. Effects of different taping methods on knee joint stress during drop jump landing. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2023;27(30):4850-4855.

0 引言 Introduction

在运动中,下肢的神经肌肉控制与膝关节运动损伤息息相关,目前已有许多筛查方法如侧切、急停起跳及跳深运动被用来评估在运动中下肢保持解剖对齐及动态控制能力^[1-3]。跳深着陆是运动中常见的跳跃动作,如篮球运动员在前跳抢球后立即进行纵跳投篮,此时下肢关节在进行落地缓冲时的动态控制能力尤为重要^[4-5]。相关研究发现,在落地缓冲阶段许多非接触性运动损伤与下肢的动态控制能力降低有关,如在落地时膝关节屈曲角度降低、外翻及内旋角度增加,腓绳肌激活降低、股四头肌激活增加导致的下肢动态外翻运动会增加前交叉韧带的损伤风险^[6-9]。

为降低下肢运动损伤风险、提高神经肌肉的动态控制能力,学者们开始研究各种预防性的保护措施,而贴扎作为一种简单方便的保护方法被广泛应用于各种不同运动场景中,目前常用的贴布主要包括肌内效贴、白贴、重弹及轻弹贴布等^[10-13]。肌内效贴是一种弹性治疗胶带,采用不同的贴扎方法能促进或抑制肌肉的活动且不妨碍正常的关节运动^[11, 14];白贴是无弹性贴布,黏性强,其作用主要是对关节进行固定,限制关节活动^[12, 15];而重弹与轻弹贴布带有不同程度的弹性,在对关节进行固定限制时也可提供弹性保护^[10, 13]。大部分学者认为,在运动中使用不同类型的贴布和不同种类的贴扎方法,能保护肌肉骨骼、提高运动表现能力、降低运动损伤风险^[15-17]。NOKHODCHI等^[14]采用促进腓绳肌、抑制股四头肌收缩的肌内效贴贴扎方法,能在运动中增加膝关节屈曲角度、降低地面反作用力。GUNER等^[17]采用促进股四头肌收缩的肌内效贴贴扎方法,在行走过程中增加了步频、步幅及膝关节伸展角度,提高了行走中的步态表现。但也有部分学者持有相反的观点,STRUTZENBERGER等^[18]认为肌内效贴贴扎并不能改善男子橄榄球运动者的运动表现能力;DE HOYO等^[19]发现在使用贴扎后并未改善男子足球运动者的肌肉激活、跳跃能力、最大等速肌力和肌肉耐力。

目前对于防止膝关节损伤的常见贴扎方式主要有两种:

一种是通过使用肌内效贴来促进或抑制膝关节肌肉收缩,以提高关节的动态稳定性^[14, 20];另外一种是使用重弹贴扎,通过固定关节来限制关节活动的方式提高关节的稳定性^[21-22]。但目前大部分关于膝关节贴扎的研究仅从运动学、动力学及肌肉电生理学等角度进行探索,而对贴扎后膝关节软骨、半月板、前交叉韧带等组织承受应力及应力分布特征尚不清楚。因此,该研究将运动学和逆动力学计算结果与膝关节三维有限元仿真相结合,探索不同的贴扎方式对女性篮球运动者膝关节运动学、动力学及软骨、半月板、前交叉韧带应力分布特征的影响,为不同贴扎方式在运动中防止膝关节运动损伤提供理论依据。

1 对象和方法 Subjects and methods

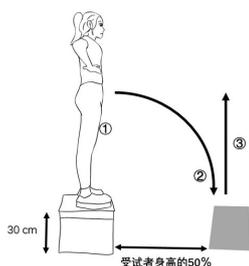
- 1.1 设计 前瞻性研究,采用重复测量方差分析对运动学、动力学数据进行统计分析。
- 1.2 时间及地点 试验于2022年3-6月在武汉体育学院国家体育总局体育工程重点实验室、湖北省运动装备工程技术研究中心完成。
- 1.3 对象 招募10名武汉体育学院篮球专项的女大学生,身高(166.60±1.64) cm,体质量(57.50±2.87) kg,年龄(22.40±1.77)岁,受试者有参加篮球比赛的经验,每周进行篮球运动≥3次,每次运动≥1 h。要求每位受试者无下肢膝关节手术史、损伤史,近半年内无严重下肢运动损伤,优势腿均为右侧下肢。受试者对研究知情同意并签署知情同意书。此次研究获得武汉体育学院伦理委员会批准(受理编号:2022044)。

样本量计算:研究以预试验缓冲阶段峰值内旋角为主要结局指标,3次测量均数分别为3.16, 3.28, 0.63,测量间相关系数为1,双侧检验 α 为0.05,Power为0.90,输入PASS 15软件(NCSS, Kaysville, Utah, USA) Repeated Measures Analysis中可算得至少需要入组7例。

1.4 材料 此次研究采用重庆护力特体育用品有限公司生产的防水弹力透气胶布 (F10702/3)、高防水高弹力肌贴胶布 (F10507), 用于运动损伤防护。

1.5 方法

1.5.1 测试前准备 测试前要求受试者更换研究提供的紧身衣物, 试验人员为受试者讲解跳深动作, 受试者先完成 3 次跳深动作以熟悉试验测试流程^[23-25], 见图 1。每位受试者总共进行 3 次测试, 每次试验间隔为 1 d, 分别为无贴扎、肌内效贴扎、重弹贴扎, 贴扎的作用均为保护前交叉韧带改善下肢动态外翻模式, 为避免试验顺序对试验结果造成的影响, 采用拉丁方阵设计受试者试验顺序。



图注: ①、②为缓冲阶段, ③为垂直纵跳阶段

图 1 | 跳深动作

Figure 1 | Drop jump landing

1.5.2 贴扎要求

肌内效贴扎^[14, 20, 26] (图 2A): ①股四头肌抑制贴扎: 受试者仰卧位、髋关节屈曲 30°、膝关节屈曲 60°, 使用 Y 型贴布, 自然拉力, 锚固定于胫骨转子, 尾分别沿内外侧股四头肌止于大腿近端; ②腘绳肌促进贴扎: 受试者俯卧位, 膝关节稍屈曲, 使用 Y 型贴布, 自然拉力, 锚固定于坐骨结节下方的腘绳肌肌腹, 尾分别沿内外侧肌肉止于胫骨内侧髌及腓骨小头上方; ③ I 型贴布稳定膝关节贴法: 使用 I 型贴布中间为锚, 固定于胫骨转子的上方, 中度拉力将尾部两侧斜向上延展。

重弹贴扎^[21-22] (图 2B): 在贴扎前, 脚后跟下方放一脚垫, 使膝关节微屈; 在膝关节的近端和远端进行锚点固定贴扎, 要求上下锚点的距离相等; 由腓肠肌末端经小腿前侧向股直肌中端做 S 型缠绕, 内外侧各一道; 最后由膝关节后侧向前做 X 型髌骨固定贴扎。



图注: A 为肌内效贴扎, B 为重弹贴扎

图 2 | 贴扎方式示意图

Figure 2 | Schematic diagrams of taping methods

受试者在贴扎完成后粘贴 36 个直径 14 mm 的 marker 点^[27], 再进行 10 min 的准备活动。采用 Vicon 三维光学运动捕捉系统 (英国, Oxford Metrics Limited, 采样频率 200 Hz) 和 Kistler 三维测力台 (瑞士, Kistler, 采样频率 1 000 Hz) 完成跳深着陆数据采集, 跳深着陆要求动作平稳无停顿, 为避免受试者疲劳, 每次跳深间隔 1 min, 共采集 3 次有效数据, 取平均值。

采用 Visual 3D (美国, C-Motion) 分析软件对数据进行计算处理。选取缓冲阶段的触地时刻、垂直地面反作用力峰值时刻及整个着陆缓冲阶段膝关节峰值三维运动学、动力学进行分析。

1.5.3 膝关节有限元模型仿真 采用 MRI 和 CT 对一名女性受试者右膝关节于屈曲 36° 进行矢状位、横轴位、冠状位 3 个方位的扫描 (MRI 扫描层厚 1 mm、CT 扫描层厚 0.5 mm)。将扫描影像学资料保存为 DICOM 格式, 导入 Mimics 21.0 进行图像分割、三维重建, Geomagic 2017 进行平滑去噪、拟合曲面, Solidworks 2017 进行模型组装, 最后在 Ansys 17.0 定义材料属性、进行网格划分、设置接触。构建该模型所需的材料属性及网格划分见表 1^[28-30]。

表 1 | 模型材料属性

Table 1 | Material properties of models

组织结构	弹性模量	泊松比	单元类型	网格尺寸	材料类型
骨	11 000 MPa	0.3	四面体	3 mm	各向同性线性弹性材料
软骨	5 MPa	0.46	四面体与六面体混合划分	2 mm	各向同性线性弹性材料
半月板	59 MPa	0.49	四面体与六面体混合划分	2 mm	各向同性线性弹性材料
韧带	215.3 MPa	0.4	四面体与六面体混合划分	2 mm	各向同性线性弹性材料

边界条件及加载条件: 为了使有限元模型更加接近实际膝关节, 设置软骨与骨、韧带起止与骨相接处的部位为绑定接触; 膝关节内部结构如半月板与软骨、韧带之间互相接触部位为无摩擦接触。根据以往研究, 缓冲阶段垂直地面反作用力峰值时刻是膝关节损伤的高峰期^[31-33], 因此以垂直地面反作用力峰值时刻无贴扎、肌内效贴扎、重弹贴扎 3 组膝关节的三维运动学角度作为边界条件, 同时约束腓骨、胫骨的自由度, 股骨的自由度不受约束, 以膝关节反作用力计算出沿股骨长轴方向的合力作为载荷, 计算出膝关节模型的应力分布情况。

1.6 主要观察指标 受试者膝关节三维运动学角度及三维动力学力矩; 有限元模型中股骨软骨、胫骨软骨、半月板、前交叉韧带的 von-Mises 应力。

1.7 统计学分析 实验数据使用 SPSS 26.0 软件进行统计分析, 数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用重复测量方差分析对运动学、动力学数据进行统计分析, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。该文统计学方法已经武汉体育学院生物统计学专家审核。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 10 名受试者均顺利完成测试, 未发生任何不良事件, 全部进入结果分析。

2.2 受试者膝关节运动学与动力学特征 由表 2 可知, 在跳深着陆中, 无贴扎组、肌内效贴扎组触地时刻膝关节内 / 外翻角大于重弹贴扎组 ($P=0.009$, $P=0.029$); 无贴扎组垂直地面反作用力峰值时刻膝关节内 / 外翻角大于肌内效贴扎组、重弹贴扎组 ($P=0.006$, $P=0.005$); 3 组触地时刻、垂直地面反作用力峰值时刻膝关节屈 / 伸、内 / 外旋角比较差异均无显著性意义 ($P > 0.05$)。无贴扎组缓冲阶段峰值膝外翻角大

表 2 | 不同贴扎方式下受试者膝关节三维角度比较 ($\bar{x}\pm s, n=10, ^\circ$)

Table 2 | Comparison of three-dimensional angle of knee joint with different taping methods

测试指标	无贴扎组	肌内效贴扎组	重弹贴扎组	F 值	P 值
触地时刻屈 / 伸角	-24.35±7.67	-22.84±5.53	-25.04±8.14	0.434	0.654
触地时刻内 / 外翻角	-0.27±2.06	-0.08±1.89	1.17±3.01 ^{ab}	7.022	0.006
触地时刻内 / 外旋角	-3.69±3.61	-4.86±4.68	-5.63±4.98	1.735	0.205
垂直地面反作用力峰值时刻屈 / 伸角	-42.00±10.93	-43.74±13.79	-41.62±12.73	0.222	0.803
垂直地面反作用力峰值时刻内 / 外翻角	-0.89±2.74	0.98±1.72 ^a	1.79±2.08 ^a	11.035	0.001
垂直地面反作用力峰值时刻内 / 外旋角	-0.37±3.08	-1.94±2.84	-2.19±5.86	0.863	0.439
缓冲阶段峰值屈曲角	-97.56±19.33	-94.56±14.26	-97.53±12.03	0.636	0.474
缓冲阶段峰值外翻角	-4.47±3.26	-1.41±2.83 ^a	-0.83±3.49 ^a	10.643	0.001
缓冲阶段峰值内翻角	0.97±3.19	3.69±3.24 ^a	5.46±4.46 ^a	7.643	0.004
缓冲阶段峰值外旋角	-6.35±3.96	-7.22±4.92	-7.02±5.13	0.362	0.594
缓冲阶段峰值内旋角	3.58±5.42	3.83±5.13	0.81±4.71 ^{ab}	6.076	0.010

表注: 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。与无贴扎组比较, ^a $P < 0.05$; 与肌内效贴扎组比较, ^b $P < 0.05$

于肌内效贴扎组、重弹贴扎组 ($P=0.008, P=0.000$), 缓冲阶段峰值膝内翻角小于肌内效贴扎组、重弹贴扎组 ($P=0.034, P=0.003$); 无贴扎组、肌内效贴扎组缓冲阶段峰值膝内旋角大于重弹贴扎组 ($P=0.007, P=0.038$), 3 组缓冲阶段峰值膝关节屈曲与外旋角比较差异均无显著性意义 ($P > 0.05$)。

由表 3 可知, 在跳深着陆中, 3 组触地时刻、垂直地面反作用力峰值时刻、缓冲阶段膝关节三维力矩比较差异均无显著性意义 ($P > 0.05$)。

表 3 | 不同贴扎方式下受试者膝关节三维力矩比较 ($\bar{x}\pm s, n=10, \text{Nm/kg}$)

Table 3 | Comparison of three-dimensional torque of knee joint with different taping methods

测试指标	无贴扎组	肌内效贴扎组	重弹贴扎组	F 值	P 值
触地时刻屈 / 伸力矩	-0.14±0.26	-0.08±0.41	-0.01±0.41	0.086	0.918
触地时刻内 / 外翻力矩	0.08±0.19	0.08±0.18	0.04±0.06	0.239	0.790
触地时刻内 / 外旋力矩	-0.01±0.45	0.00±0.05	-0.01±0.06	0.255	0.778
垂直地面反作用力峰值时刻屈 / 伸力矩	1.38±1.29	1.15±0.95	1.38±1.30	0.370	0.696
垂直地面反作用力峰值时刻内 / 外翻力矩	-0.32±0.31	-0.31±0.30	-0.30±0.51	0.010	0.954
垂直地面反作用力峰值时刻内 / 外旋力矩	0.11±0.17	0.03±0.12	0.07±0.15	4.660	0.230
缓冲阶段峰值屈曲力矩	-0.17±0.28	-0.35±0.56	-0.40±0.63	0.799	0.465
缓冲阶段峰值伸展力矩	2.68±0.57	2.39±0.50	2.64±0.51	1.727	0.206
缓冲阶段峰值外翻力矩	-0.52±0.22	-0.49±0.26	-0.62±0.33	1.254	0.309
缓冲阶段峰值内翻力矩	0.30±0.17	0.33±0.15	0.26±0.17	0.966	0.399
缓冲阶段峰值外旋力矩	-0.03±0.05	-0.04±0.68	-0.06±0.57	1.180	0.330
缓冲阶段峰值内旋力矩	0.25±0.16	0.24±0.09	0.25±0.10	0.019	0.982

表注: 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

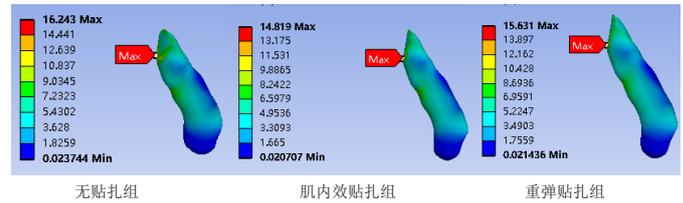
由表 4 知, 在跳深着陆中, 3 组间垂直地面反作用力峰值比较差异无显著性意义 ($P > 0.05$); 在垂直地面反作用力峰值时刻, 无贴扎组、肌内效贴扎组、重弹贴扎组股骨长轴方向的合力分别为 1 339, 1 220, 1 286 N。

2.3 膝关节有限元模型计算结果 不同贴扎方式下各组模型前交叉韧带的 von-Mises 应力分布如图 3 所示, 无贴扎组、肌内效贴扎组及重弹贴扎组前交叉韧带的 von-Mises 峰值应力分别为 16.24, 14.81, 15.63 MPa, 峰值应力均集中在股骨附着点处, 其余部位应力分布相似。

表 4 | 不同贴扎方式垂直地面反作用力、股骨长轴方向的合力比较

Table 4 | Comparison between vertical ground reaction force and joint forces in the direction of long axis of femur with different taping methods

测试指标	无贴扎组	肌内效贴扎组	重弹贴扎组	F 值	P 值
垂直地面反作用力峰值	1273.80±289.55	1223.16±299.03	1312.10±295.46	0.350	0.709
股骨长轴方向的合力	1 339	1 220	1 286		

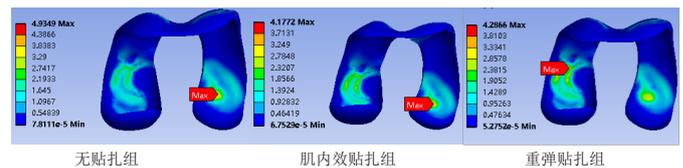


图注: 无贴扎组、肌内效贴扎组及重弹贴扎组前交叉韧带的 von-Mises 峰值应力分别为 16.24, 14.81, 15.63 MPa, 峰值应力均集中在股骨附着点处, 其余部位应力分布相似

图 3 | 各组模型前交叉韧带的 von-Mises 应力分布

Figure 3 | von-Mises stress distribution of anterior cruciate ligament in each group

图 4 为不同贴扎方式下各组模型膝关节股骨软骨 von-Mises 应力分布, 无贴扎组与肌内效贴扎组股骨软骨峰值应力集中在股骨软骨外侧髁中部, 峰值应力分别为 4.93, 4.17 MPa; 重弹贴扎组峰值应力集中在股骨软骨内侧髁中部, 峰值应力为 4.28 MPa; 无贴扎组、肌内效贴扎与重弹贴扎组其他部位应力分布较为均匀, 均分布于股骨软骨负重区。

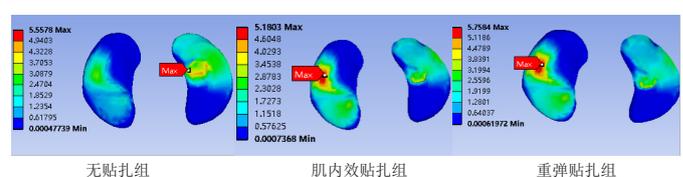


图注: 无贴扎组与肌内效贴扎组股骨软骨峰值应力集中在股骨软骨外侧髁中部, 峰值应力分别为 4.93, 4.17 MPa; 重弹贴扎组峰值应力集中在股骨软骨内侧髁中部, 峰值应力为 4.28 MPa; 无贴扎组、肌内效贴扎与重弹贴扎组其他部位应力分布较为均匀, 均分布于股骨软骨负重区

图 4 | 各组模型股骨软骨的 von-Mises 应力分布

Figure 4 | von-Mises stress distribution of femoral cartilage in each group

胫骨软骨 von-Mises 应力分布如图 5 所示, 无贴扎组峰值应力出现在外侧胫骨软骨中部内侧, 峰值应力为 5.55 MPa, 而肌内效贴扎组与重弹贴扎组峰值应力出现在内侧胫骨软骨中部外侧, 峰值应力分别为 5.18, 5.75 MPa; 3 组胫骨软骨应力分布区域相似, 均集中于外侧胫骨软骨前部与中部、内侧胫骨软骨中部与后部。

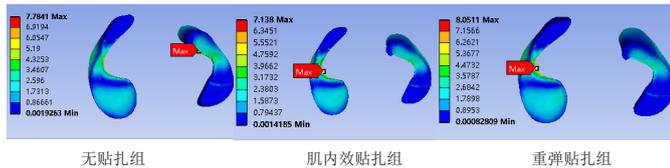


图注: 无贴扎组峰值应力出现在外侧胫骨软骨中部内侧, 峰值应力为 5.55 MPa, 而肌内效贴扎组与重弹贴扎组峰值应力出现在内侧胫骨软骨中部外侧, 峰值应力分别为 5.18, 5.75 MPa; 3 组胫骨软骨应力分布区域相似, 均集中于外侧胫骨软骨前部与中部、内侧胫骨软骨中部与后部

图 5 | 各组模型胫骨平台软骨的 von-Mises 应力分布

Figure 5 | von-Mises stress distribution of tibial cartilage in each group

图6为不同的贴扎方式下各组模型膝关节双侧半月板 von-Mises 应力分布, 无贴扎组峰值应力集中在外侧半月板前角内侧缘, 峰值应力为 7.78 MPa; 而肌内效贴扎组与重弹贴扎组峰值应力集中在内侧半月板体部内侧缘, 峰值应力分别为 7.13, 8.05 MPa; 3组半月板应力分布区域相似, 均集中在外侧半月板前角与体部、内侧半月板体部与后角。



图注: 无贴扎组峰值应力集中在外侧半月板前角内侧缘, 峰值应力为 7.78 MPa; 而肌内效贴扎组与重弹贴扎组峰值应力集中在内侧半月板体部内侧缘, 峰值应力分别为 7.13, 8.05 MPa; 3组半月板应力分布区域相似, 均集中在外侧半月板前角与体部、内侧半月板体部与后角

Figure 6 | von-Mises stress distribution of bilateral meniscus in each group

3 讨论 Discussion

膝关节作为下肢主要负重关节在运动中的损伤风险显著增加, 因此如何在运动中改善下肢的运动模式, 降低膝关节损伤风险备受学者们的关注。此次研究将运动学与逆动力学计算结果与膝关节三维有限元仿真结合, 分析跳深着陆时不同贴扎方式对膝关节运动学、动力学的影响, 以及膝关节软骨、半月板、前交叉韧带的 von-Mises 应力及应力分布差异。

膝关节运动学与动力学研究结果显示, 在跳深着陆中采用肌内效贴扎与重弹贴扎对降低着陆时的膝关节外翻角度和增加缓冲时膝关节峰值内翻角度均有良好的效果, 但肌内效贴扎不能降低触地时刻的膝关节外翻角度, 以及对缓冲阶段膝峰值内翻角度的改善作用不如重弹贴扎; 此外, 重弹贴扎还能降低缓冲阶段峰值内旋角度, 对膝关节的动态稳定控制较好。根据以往的研究, 膝关节在运动中额状面外翻角度增加是导致膝关节损伤的重要因素。刘卉等^[34]通过对比男子与女性足球运动者在侧切中膝关节运动学差异, 认为女性足球运动者膝关节外翻角度较大会导致运动中前交叉韧带承受负荷增加。GARCIA-LUNA 等^[35]认为在跳跃着陆及侧切等任务中, 70%–80% 的前交叉韧带损伤与膝关节外翻负荷增加有关, 因此在运动中采用贴扎可以有效改善因额状面的膝关节外翻角度增加而造成的膝关节损伤。研究表明, 采用不同贴扎方法可以有效改善本体感觉, 抑制 / 促进肌肉活动来预防或治疗运动损伤^[36-37]。此次研究结果显示, 采用肌内效贴与重弹贴扎均能改善跳跃中膝关节额状面的关节运动范围, 但重弹贴扎的黏性强、弹力小, 贴扎后对关节的固定效果更佳, 所以在改善关节额状面与水平面活动方面, 重弹贴扎 > 肌内效贴扎 > 无贴扎。GUNER 等^[17]采用促进股四头肌收缩的肌内效贴扎方式, 在行走过程中增加了步频、步幅及膝关节伸展角度, 提高了行走的步态表现。刘立等^[21]研究在使用肌内效贴扎及重弹贴扎后, 发现贴扎能增加膝关节屈曲角度, 降低地面反作用力。而此次研究发现, 采用肌内效贴扎与重

弹贴扎均对膝关节矢状面的运动角度及三维动力学无改善作用, 分析其原因可能是: 因为研究选取的人群为女性篮球专项学生, 平时针对性的训练能有效改善其落地模式, 所以研究的贴扎方式仅能改善其膝关节额状面与水平面的控制; 同时采用的是跳深动作, 受试者需要在一定高度和一定距离进行落地缓冲, 着陆缓冲后还需进行一个最大的垂直跳跃, 与其他研究相比, 动作难度更高要求更为复杂, 贴扎对改善关节大范围活动的控制能力较差。

通过对比膝关节内部应力峰值分布图发现, 肌内效贴扎组的膝关节内部应力峰值均小于未贴扎组与重弹贴扎组, 而重弹贴扎组的前交叉韧带与股骨软骨应力峰值小于未贴扎组, 胫骨软骨与半月板的应力峰值大于未贴扎和肌内效贴扎组, 其原因可能是: 采用肌内效贴扎后不仅能改善关节的本体感觉, 而且与重弹贴扎相比, 肌内效贴扎对关节活动限制小, 因此落地缓冲时动作柔和, 地面反作用力有降低的趋势, 导致膝关节内部峰值应力降低; 而重弹贴扎的主要作用是对关节进行限制, 对关节的固定效果极佳, 所以在重弹贴扎后, 虽然并未发现 3 组间的地面反作用力有统计学差异, 但是与无贴扎组和肌内效贴扎组相比, 落地缓冲时地面反作用力略有增加, 所以胫骨软骨与半月板上的峰值应力略高于无贴扎与肌内效贴扎组, 但由于重弹贴扎的固定作用, 落地缓冲时对膝关节额状面与水平面的控制较好、整体姿势变异性小, 所以重弹贴扎与无贴扎相比, 能降低前交叉韧带与股骨软骨上的应力, 总之在降低关节峰值应力上肌内效贴扎 > 重弹贴扎 > 无贴扎。同时, 对比股骨软骨、胫骨软骨、半月板峰值应力分布区域发现, 未贴扎组与肌内效贴扎组股骨软骨峰值应力分布在股骨软骨外侧髁的中部, 重弹贴扎组集中在股骨软骨内侧髁的中部; 未贴扎组胫骨软骨与半月板峰值应力集中在外侧胫骨软骨中部与外侧半月板前角偏内侧缘; 而肌内效贴扎与重弹贴扎组峰值应力集中在内侧胫骨软骨中部偏外侧、内侧半月板体部内侧缘。总体来看, 未贴扎组膝关节峰值应力主要集中在外侧软骨中部偏内侧与外侧半月板前角内侧缘, 而肌内效贴扎与重弹贴扎组峰值应力主要集中在内侧软骨中部偏外侧与内侧半月板的体部内侧缘, 贴扎组峰值应力虽整体向内侧偏移但内外侧应力分布更加均匀, 同时贴扎后膝关节内部应力降低, 这可能与贴扎能改善膝关节额状面的运动有关, 受试者在贴扎后进行落地缓冲时能有效控制膝关节外翻角度, 改善着陆时下肢关节的力线, 提高下肢关节的动态控制能力。采用贴扎的保护方式不仅能降低膝关节内部峰值应力, 而且还能使膝关节内外侧应力分布更加均衡, 这一研究结果与国内外大部分研究结果相似。WU 等^[38]认为, 在运动时使用预防性保护措施如护膝、贴扎可以有效降低关节内部组织的应力与应变。刘立等^[21]认为使用预防前交叉韧带损伤的肌内效贴扎可以有效降低胫骨前剪切力, 从而保护膝关节。膝关节作为下肢链关键的一环, 对保持关节的解剖对齐有着重要的作用, 膝关节在运动中的外翻、内旋活动增加会导致足旋前、股骨内收, 使肌肉的长度与张力关系改变, 这不仅使膝关节本身的运动损伤风险增加, 而且也会增

加髌、踝关节的损伤风险^[2, 39]。此次研究结果显示, 使用贴扎有效控制了膝关节在跳深运动中的动态稳定性, 为降低下肢关节运动损伤风险提供了重要的保障。

研究分析了在跳深着陆时不同贴扎方式对篮球专项女大学生膝关节运动学、动力学及膝关节内部应力特征的影响, 但仅探索了 2 种不同的贴扎方式, 未来研究可采取不同类型的贴扎方式与种类, 在不同的贴扎时间和不同类型的运动人群中探索贴扎对膝关节的影响, 为降低膝关节损伤风险提供有效的贴扎方法。

综上所述, 在跳跃类运动中, 采用肌内效贴扎与重弹贴扎能有效改善膝关节在额状面的运动控制能力, 降低膝关节外侧软骨、半月板与前交叉韧带的应力; 此外, 重弹贴扎对于降低水平面峰值膝内旋角度也有一定作用。因此, 在运动中, 膝关节额状面与水平面运动控制能力较差、膝关节外侧疼痛及患有外侧膝骨关节炎的人群, 可采用贴扎改善运动控制能力, 提高膝关节在运动中的稳定性, 降低膝关节内部应力。

作者贡献: 向福荣、陈建进行试验设计, 向福荣、唐圣鑫、欧丽珍、林熙凯进行数据采集与处理, 向福荣、欧丽珍进行论文撰写, 陈建进行论文校审。

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。

前瞻性临床研究数据共享声明: 文章作者同意: ①可以在一定范围内开放研究参与者去标识的个体数据; ②可以在一定范围内开放共享文章报告结果部分的去标识个体基础数据, 包括正文、表、图及附件; ③可以在一些情况下开放研究方案和知情同意书等相关文档; ④全文开放获取数据的时间是从文章出版后即刻, 并无终止日期。

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: 该研究遵守《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表宗旨。

4 参考文献 References

- YANG C, YAO W, GARRETT W, et al. Effects of an Intervention Program on Lower Extremity Biomechanics in Stop-Jump and Side-Cutting Tasks. *Am J Sports Med.* 2018;46(12):3014-3022.
- DAI B, GARRETT W, GROSS M, et al. The effect of performance demands on lower extremity biomechanics during landing and cutting tasks. *J Sport Health Sci.* 2019;8(3):228-234.
- PFILF KR, HART JM, HERMAN DC, et al. Different exercise training interventions and drop-landing biomechanics in high school female athletes. *J Athl Train.* 2013; 48(4):450-462.
- PADUA DA, MARSHALL SW, BOLING MC, et al. The Landing Error Scoring System (LESS) Is a valid and reliable clinical assessment tool of jump-landing biomechanics: The JUMP-ACL study. *Am J Sports Med.* 2009;37(10):1996-2002.
- 张美珍, 刘卉, 刘万将, 等. 随机生物力学模型分析篮球运动员和普通大学生 ACL 损伤危险因素的差异 [J]. *体育科学*, 2016, 36(10):8.
- STRAUB R, HORGAN A, POWERS C. Estimation of vertical ground reaction force parameters during athletic tasks using 2D video. *Gait Posture.* 2021;90:483-488.
- SCARBOROUGH DM, LINDERMAN SE, COHEN VA, et al. Neuromuscular Control of Vertical Jumps in Female Adolescents. *Sports Health.* 2019;11(4):343-349.
- BENCKE J, AAGAARD P, ZEBIS K. Muscle Activation During ACL Injury Risk Movements in Young Female Athletes: A Narrative Review. *Physiol.* 2018;9:445.
- HUSTED RS, BENCKE J, ANDERSEN LL, et al. A comparison of hamstring muscle activity during different screening tests for non-contact ACL injury. *Knee.* 2016; 23(3):362-366.
- HUANG C, HSIEH T, LU S, et al. Effect of the Kinesio tape to muscle activity and vertical jump performance in healthy inactive people. *Biomed Eng Online.* 2011;10(1):70.
- 段高营, 罗炯, 刘立, 等. 膝关节防护与康复中肌内效贴扎的生物力学作用及优势 [J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(31):5062-5068.

- TSAI FH, CHU IH, HUANG CH, et al. Effects of Taping on Achilles Tendon Protection and Kendo Performance. *J Sport Rehabil.* 2018;27(2):157-164.
- 宋法明. 不同膝关节贴扎类型对足球运动员急停动作稳定性的影响 [J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(10):1583-1588.
- NOKHODCHI N, HOSSEINI M, ATTARAN IRAJ Z, et al. The Effects of Kinesio-tape through Facilitation of Hamstring and Inhibition of Quadriceps on Biomechanical Variables affecting Anterior Cruciate Ligament Injury When Landing in Active Healthy Young Women. *J Adv Sport Technol.* 2020;4(2):104-113.
- CHOI SH, LIM G. Immediate Effects of Ankle Non-elastic Taping on Balance and Gait Ability in Patients With Chronic Stroke: A Randomized, Controlled Trial. *J Manipulative Physiol Ther.* 2020;43(9):922-929.
- HAMZAH A, BERLIANA B, PITRIANI P, et al. The Effects of Kinesio Taping on the Lower-Body Injury Rehabilitation in Female Futsal Athletes. 4th International Conference on Sport Science, Health, and Physical Education (ICSSHPE 2019). 2020:144-147.
- GUNER S, ALSANCAK S, KOZ M. Effect of two different kinesio taping techniques on knee kinematics and kinetics in young females. *J Phys Ther Sci.* 2015;27(10): 3093-3096.
- STRUTZENBERGER G, MOORE J, GRIFFITHS H, et al. Effects of gluteal kinesio-taping on performance with respect to fatigue in rugby players. *Eur J Sport Sci.* 2016;16(2):165-171.
- DE HOYO M, ÁLVAREZ-MESA A, SAÑUDO B, et al. Immediate effect of kinesio taping on muscle response in young elite soccer players. *J Sport Rehabil.* 2013; 22(1):53-58.
- 祁奇, 陈文华, 余波, 等. 肌内效贴对女性大学生膝关节肌力的影响 [J]. *中国康复理论与实践*, 2015(7):849-853.
- 刘立, 张庭然, 罗炯, 等. 不同类型贴扎对急停时膝关节的影响 [J]. *中国康复理论与实践*, 2018, 24(11):1349-1354.
- HUANG YL, LIN KW, CHOU LW, et al. Immediate Effect of Anterior Cruciate Ligament Protective Knee Taping on Knee Landing Mechanics and Muscle Activations during Side Hops. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(19):10110.
- 周志鹏, 曲峰. 3 种常见评估前交叉韧带损伤风险落地动作的对比研究 [J]. *天津体育学院学报*, 2016, 31(5):455-460.
- 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. *Res Sports Med.* 2013;21(4):330-342.
- SMITH HC, JOHNSON RJ, SHULTZ SJ, et al. A prospective evaluation of the Landing Error Scoring System (LESS) as a screening tool for anterior cruciate ligament injury risk. *Am J Sports Med.* 2012;40(3):521-526.
- AKBARI M, PAHNABI G, KARIMI H. Immediate Effect of Kinesio Taping on Knee Joint Position Sense after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Clin Physiother Res.* 2017;4(4):162-168.
- 潘正晔, 马勇, 王虹, 等. 四种方向单腿跳膝关节应力分布特征的有限元分析 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(9):1038-1043.
- ZHANG X, YUAN S, WANG J, et al. Biomechanical characteristics of tibio-femoral joint after partial medial meniscectomy in different flexion angles: a finite element analysis. *BMC Musculoskel Disord.* 2021;22(1):322.
- MAKINEJAD MD, OSMAN NA, ABAS WA, et al. Preliminary analysis of knee stress in Full Extension Landing. *Clinics.* 2013;68(9):1180-1188.
- 陈文栋, 杨光. 膝关节半月板三维有限元模型的动态仿真生物力学分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(31):4658-4664.
- HOLDEN S, DOHERTY C, BOREHAM C, et al. Sex differences in sagittal plane control emerge during adolescent growth: a prospective investigation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(2):419-426.
- PEEBLES AT, DICKERSON LC, RENNER KE, et al. Sex-based differences in landing mechanics vary between the drop vertical jump and stop jump. *J Biomech.* 2020; 105:109818.
- BATES NA, FORD KR, MYER GD, et al. Timing differences in the generation of ground reaction forces between the initial and secondary landing phases of the drop vertical jump. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2013;28(7):796-799.
- 刘卉, 美珍, 李翰君, 等. 足球运动员在急停起跳和侧切动作中前交叉韧带损伤的生物力学特征研究 [J]. *体育科学*, 2011, 31(12):38-43.
- GARCIA-LUNA MA, CORTELL-TORMO JM, GARCIA-JAEN M, et al. Acute Effects of ACL Injury-Prevention Warm-Up and Soccer-Specific Fatigue Protocol on Dynamic Knee Valgus in Youth Male Soccer Players. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17(15):5608.
- BEREZUTSKY V. Possibilities of kinesio taping to prevent injuries of professional dancers. *Int J Occup Saf Ergon.* 2019;25(4):638-645.
- BIZ C, NICOLETTI P, TOMASIN M, et al. Is Kinesio Taping Effective for Sport Performance and Ankle Function of Athletes with Chronic Ankle Instability (CAI)? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicina (Kaunas).* 2022;58(5):620.
- WU X, PEI B, WANG W, et al. Finite Element Analysis of a Novel Approach for Knee and Ankle Protection during Landing. *Appl Sci.* 2021;11(4):1912.
- 刘丽娟, 敖丽娟. 前交叉韧带重建术后的生物力学研究现状 [J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30(6):619-622.

(责任编辑: GW, ZN, ZJP)