

文章编号:1004-7220(2021)02-0309-08

# 性别和动作对排球运动员前交叉韧带损伤危险因素的影响

张美珍<sup>1a,2</sup>, 刘瑞瑞<sup>1a</sup>, 刘卉<sup>3</sup>, 李翰君<sup>3</sup>, 武晓刚<sup>1b</sup>, 陈维毅<sup>1b</sup>

(1. 太原理工大学 a.体育学院, b.生物医学工程学院, 太原 030024; 2. 上海交通大学 生命科学技术学院, 上海 200030;  
3. 北京体育大学 中国运动与健康研究院, 北京 100084)

**摘要:**目的 研究性别和动作对排球运动员前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤危险因素的影响。方法 采集排球运动员急停起跳、起跳垂直落地和急停变向跑时的运动生物力学数据,运用蒙特卡罗模拟得到运动员 ACL 损伤概率和损伤试跳的生物力学参数。采用 2×3 混合设计的双因素方差分析验证性别和动作对损伤危险因素的影响。结果 不论男女,变向跑 ACL 损伤危险性最大( $P<0.001$ )。变向跑和急停起跳时,女子比男子运动员 ACL 损伤危险更大( $P<0.001$ )。垂直落地时,男子比女子运动员更易发生损伤( $P<0.001$ )。排球运动员 ACL 损伤危险因素均受性别和动作的显著性交互作用( $P<0.001$ )。结论 变向跑时,男子运动员由于膝关节屈角小、小腿趋于前倾以及足跟着地而增加 ACL 负荷,女子运动员倾向于由于较大地面反作用力和膝关节伸展力矩而增加损伤风险。膝关节屈角小是运动员急停起跳的主要损伤因素,且男子因素更繁杂。垂直落地时,女子运动员损伤危险因素是地面反作用力、膝关节外翻和伸展力矩及足跟着地等,较小的膝关节屈角是男子运动员损伤危险因素。研究结果可为排球运动员 ACL 损伤风险评价、个性化损伤预防方案制定、临床与康复治疗等提供依据。

**关键词:**前交叉韧带损伤;排球动作;运动学;动力学;肌肉激活

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.02.022

## Effects of Gender and Maneuvers on ACL Injury Risk Factors for Volleyball Players

ZHANG Meizhen<sup>1a,2</sup>, LIU Ruirui<sup>1a</sup>, LIU Hui<sup>3</sup>, LI Hanjun<sup>3</sup>, WU Xiaogang<sup>1b</sup>, Chen Weiyi<sup>1b</sup>

(1a. College of Physical Education, 1b. College of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Life Science and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Institute of China Sport and Health, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** **Objective** To study the effect of gender and maneuvers on anterior cruciate ligament (ACL) injury risk factors for volleyball players. **Methods** Sports biomechanics data of volleyball players during stop-jump, drop landing and sidestep cutting were collected. The ACL injury rate and biomechanical parameters of simulated injured jumps were obtained with Monte Carlo simulation. The influence of gender and maneuvers on ACL injury risk factors was validated by 2×3 mixed designed two-way ANOVA. **Results** Sidestep cutting was the highest risk

收稿日期:2020-05-03; 修回日期:2020-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(30870600,11972242,11632013),2018年教育部人文社会科学研究规划基金项目(18YJA890034),山西省高等学校哲学社会科学基金项目(2017313,201801015,2019W025),山西省回国留学人员科研资助项目(2020-032),太原理工大学学科建设经费

通信作者:张美珍,副教授,E-mail:meizhen1116@163.com

maneuver of ACL injury for both genders ( $P < 0.001$ ). Compared with male players, female players had a greater risk of ACL injury during sidestep cutting and stop-jump ( $P < 0.001$ ), while male players were more prone to have ACL injury than female players during drop landing ( $P < 0.001$ ). The risk factors of ACL injury obtained by simulation were significantly influenced by gender and maneuvers ( $P < 0.001$ ). **Conclusions** Male players were more likely to increase ACL load due to smaller knee flexion, forward leg tilt and heel landing than female players during sidestep cutting, while female players owned larger ground reaction force (GRF) and knee extension moment. Smaller knee flexion angle during stop jump was the major risk factor for both genders, however more characteristics contributed to the males. Female players with large GRF, knee valgus and extension moment, and heel-landing were likely to have ACL injury, while the small knee flexion angle was the key risk factor for male players. The results can provide evidences for evaluation of volleyball players' ACL injury risk, individualized injury prevention protocols, and clinical treatment and rehabilitation directions.

**Key words:** anterior cruciate ligament (ACL) injury; volleyball maneuvers; kinematics; kinetics; muscle activation

运动员完成急停、跳跃落地、变向或旋转时,极易导致前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)急性损伤,而这些动作是排球进攻、拦网和发球等技术的主要组成部分,故排球运动员成为 ACL 损伤的高发人群之一<sup>[1-3]</sup>。据报道,排球运动员每 10 万小时比赛运动时长即可发生 6 例损伤病例<sup>[2]</sup>。ACL 损伤后,不论保守治疗还是手术重建均会引起患者身体功能下降以及膝关节骨关节炎发病率提高,且 ACL 二次损伤率很高<sup>[4-5]</sup>。

已有研究证明,与神经肌肉有关的生物力学因素能够很大程度地解释 ACL 损伤危险<sup>[6-7]</sup>。大量研究通过对比不同性别排球运动员完成 ACL 损伤高危动作的下肢生物力学特征,进而推断损伤危险因素<sup>[8]</sup>。研究发现,女性着地时比男性表现出更大的胫骨向前剪切力、膝关节伸展和外翻力矩以及更小的膝关节屈角<sup>[9-10]</sup>。Hewett 等<sup>[11]</sup>提出,利用膝关节外翻力矩预测女性运动员 ACL 损伤的敏感性和特异性分别为 78% 和 73%。然而,Goetschius 等<sup>[12]</sup>认为,膝关节外翻力矩与 ACL 损伤无显著相关。研究发现,伴有后续动作的单脚落地跳 ACL 损伤风险较大。侧向或对角线急停着地时,膝关节外翻角增大,ACL 损伤危险性增加<sup>[13]</sup>。Zahradnik 等<sup>[14]</sup>研究表明,排球运动员扣球后向后着地会增加垂直地面反作用力(ground reaction force, GRF)峰值和膝外翻力矩。目前,排球运动员 ACL 损伤危险性和危险因素在性别和动作之间是否存在交互影响尚不明确。此外,对比得出的运动特征差异仅仅是描述性结果,不足以定量确定损伤危险因素与损伤

之间的因果关系和损伤机制,更不能预测损伤的发生。

蒙特卡罗模拟技术不仅可以用于求解某事件出现的概率,还可以用于探索人体骨骼肌肉等受力的生物力学参数与损伤之间的因果关系。目前,该方法在生物医学等领域探究损伤危险因素有广泛应用<sup>[15-18]</sup>。在不造成受试者损伤的情况下,本文应用蒙特卡罗模拟分析运动员 ACL 损伤机制,根据以往研究结果及研究目的做出如下假设:排球运动员 ACL 损伤危险因素与性别和动作有关。研究结果可为大学生排球运动员制定针对性的损伤预防方案提供依据,降低 ACL 损伤率。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

共选取 46 名北京体育大学排球运动员为受试者,其基本信息如表 1 所示。受试者训练年限均在 5 年以上,且无 ACL 损伤史。本研究由北京体育大学科学研究伦理委员会审批,受试者在测试前签署知情同意书。

表 1 受试者基本信息

Tab.1 Basic information of the participants

| 性别 | 人数 | 年龄/岁     | 身高/cm     | 体重/kg     |
|----|----|----------|-----------|-----------|
| 男  | 24 | 21.1±3.0 | 190.1±5.9 | 82.8±12.8 |
| 女  | 22 | 19.7±1.2 | 177.9±4.0 | 66.1±6.4  |

### 1.2 数据采集

研究表明,排球运动员比赛中左脚落地比例为 16%~26%,右脚落地为 21%~27%,双脚落地为

50%~60%<sup>[3,19]</sup>。此外,落地后续动作(如变向跑或转体动作等)会增加 ACL 损伤危险性<sup>[20]</sup>。因此,本文选取助跑急停、起跳垂直双脚落地和急停 45° 变向跑为测试动作<sup>[21-22]</sup>。运用红外光点运动捕捉系统(MCU500, Qualisys 公司,瑞典)、三维测力台(9281CA, Kistler 公司,瑞士)以及表面肌电系统(ME6000, Mega 公司,芬兰)同步采集受试者运动学、动力学和表面肌电数据,并对受试者腓肠肌和股后肌进行最大等长收缩测试<sup>[22]</sup>。

### 1.3 数据处理

根据大腿和小腿三维坐标系间的欧拉角确定膝关节三维角度。通过 GRF 点与踝关节中心的距离评价足着地的方式。运用逆向动力学方法,通过 MS3D 7.0 分析软件得到膝关节三维力矩。将肌电信号进行带通平滑、低通滤波和最大等长收缩标准化处理后<sup>[15,22]</sup>,结合 Pflum 等<sup>[18]</sup>的研究结果确定肌肉分布特征。基于此,可获得用于计算 ACL 负荷的所有参数及其分布特征,通过 ACL 负荷模型确定 ACL 受力。进一步根据 ACL 负荷模型中各参数分布特征,通过蒙特卡罗模拟方法对受试者进行 100

万次动作,模拟并计算 ACL 负荷,当男性负荷超过 2.25 kN、女性超过 1.8 kN 时标记为 1 例损伤,进而确定损伤概率,并输出损伤及未损伤试跳的下肢各生物力学特征<sup>[23]</sup>。

### 1.4 数据分析

分性别和动作通过独立样本 *t* 检验确定损伤和未损伤试跳之间下肢生物力学特征的差异。采用 2×3 混合设计双因素方差分析验证性别和动作是否具有交互作用。由于性别和动作间下肢生物力学特征存在相关关系,将显著性标准调整为一类误差概率不大于 0.025。

## 2 研究结果

### 2.1 ACL 损伤模拟结果

通过模拟得到排球运动员 10 万次 3 种动作试跳时的 ACL 损伤例数(见表 2)。性别和动作对 ACL 损伤率具有显著性交互作用( $F_{[2,36]} = 8\ 692.9$ ,  $P < 0.001$ )。除垂直落地动作外,其余动作均显示女性损伤危险性更大( $P < 0.001$ )。不论男女,急停变向跑比其余动作更容易引起 ACL 损伤( $P < 0.001$ )。

表 2 蒙特卡罗模拟排球运动员不同动作 10 万次试跳的 ACL 损伤例数

Tab.2 ACL injured trials during 100 thousand jumps for players with Monte Carlo simulation

| 参数   | 男                       |                    |                     | 女                      |                     |      |
|------|-------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------|
|      | 变向跑                     | 急停起跳               | 垂直落地                | 变向跑                    | 急停起跳                | 垂直落地 |
| 损伤例数 | 1 027±29 <sup>abd</sup> | 36±4 <sup>ac</sup> | 218±13 <sup>a</sup> | 2 624±44 <sup>bd</sup> | 756±24 <sup>c</sup> | 46±7 |

注:<sup>a</sup> 性别间具有显著性差异( $P < 0.001$ );<sup>b</sup> 动作间具有显著性差异;<sup>c</sup> 急停起跳 vs. 垂直落地;<sup>d</sup> 变向跑 vs. 垂直落地; $P < 0.001$ 。

### 2.2 ACL 损伤模拟试跳下肢生物力学特征

由表 3、4 可知,不论男女和测试动作,损伤试跳膝关节屈角更小,小腿趋于前倾,压力中心(center of pressure, COP)到踝关节的水平距离短以及水平向后 GRF、膝关节内翻力矩、伸展力矩、髌韧带力、胫骨近端向前剪切力、矢状面及非矢状面负荷均显著大于未损伤试跳( $P < 0.001$ )。急停起跳时,不论男女,损伤试跳下膝关节内旋力矩与未损伤试跳均无显著性差异( $P = 0.722$ ,  $P = 0.096$ ),仅男子排球运动员损伤试跳下垂直 GRF 与未损伤试跳无显著性差异( $P = 0.504$ )。

### 2.3 性别和动作对排球运动员 ACL 损伤危险因素的影响

由图 1 方差分析得出,模拟得到的损伤试跳下

肢生物力学特征均显著地受性别和动作的交互作用影响( $P < 0.001$ )。相比男子,女子排球运动员在变向跑时表现出膝关节屈角小、小腿前倾、足跟着地特征,同时受到较小的 GRF 以及较小的膝关节伸展力矩、髌韧带力、胫骨向前剪切力、矢状面负荷( $P < 0.001$ )。在完成急停起跳时,女子运动员比男子着地时更倾向于小腿前倾、足跟着地以及大的膝关节内翻力矩、屈伸力矩、水平向后和垂直 GRF、髌韧带力、胫骨向前剪切力,同时膝关节屈角大、矢状面和非矢状面负荷小的特征( $P < 0.001$ )。急停起跳垂直落地动作时,男性除表现出更大的膝关节屈角外,其余参数性别间均具有显著性差异,并表现比女性更容易产生 ACL 损伤风险( $P < 0.001$ )。男子排球运动员完成变向跑时,较其他动作表现出更大的水

表3 蒙特卡罗模拟男性排球运动员 ACL 损伤与未损伤试跳下肢运动生物力学特征

Tab.3 Lower extremity biomechanics of injured and non-injured trials for male volleyball players with Monte Carlo simulation

| 参数             | 变向跑          |               |        | 急停起跳         |               |        | 垂直落地         |               |        |
|----------------|--------------|---------------|--------|--------------|---------------|--------|--------------|---------------|--------|
|                | 损伤           | 未损伤           | P      | 损伤           | 未损伤           | P      | 损伤           | 未损伤           | P      |
| 膝关节屈角/(°)      | 16.7±0.2     | 26.0±0.02     | <0.001 | -0.3±1.0     | 27.8±0.04     | <0.001 | 0.6±0.3      | 14.9±0.02     | <0.001 |
| 小腿倾角/(°)       | -5.6±0.2     | -6.4±0.02     | <0.001 | -10.2±1.5    | -16.3±0.02    | <0.001 | 9.5±0.3      | 7.2±0.01      | <0.001 |
| COP 到踝水平距离/m   | 0.069±0.003  | 0.083±0.0001  | <0.001 | 0.026±0.002  | 0.029±0.0003  | 0.001  | 0.101±0.002  | 0.117±0.0001  | <0.001 |
| 水平向后 GRF/(BW)  | 1.237±0.021  | 0.539±0.001   | <0.001 | 0.663±0.025  | 0.436±0.001   | <0.001 | 0.635±0.011  | 0.395±0.0004  | <0.001 |
| 垂直 GRF/(BW)    | 0.718±0.046  | 0.802±0.003   | <0.001 | 0.651±0.095  | 0.630±0.001   | 0.504  | 1.027±0.028  | 0.750±0.002   | <0.001 |
| 膝内翻力矩/(BH·BW)  | 0.040±0.003  | 0.013±0.0001  | <0.001 | 0.008±0.002  | 0.004±0.00005 | <0.001 | 0.063±0.003  | 0.014±0.0001  | <0.001 |
| 膝内旋力矩/(BH·BW)  | 0.002±0.0001 | 0.002±0.00002 | 0.021  | 0.001±0.0002 | 0.001±0.00004 | 0.722  | 0.003±0.0004 | 0.003±0.00001 | <0.001 |
| 膝伸展力矩/(BH·BW)  | 0.376±0.005  | 0.099±0.0003  | <0.001 | 0.160±0.005  | 0.072±0.0001  | <0.001 | 0.17±0.002   | 0.089±0.0001  | <0.001 |
| 股后肌肌力/(BW)     | 0.721±0.012  | 0.757±0.0003  | <0.001 | 1.267±0.123  | 1.123±0.001   | 0.005  | 0.328±0.014  | 0.322±0.0005  | 0.229  |
| 腓肠肌肌力/(BW)     | 0.281±0.002  | 0.285±0.0003  | <0.001 | 0.267±0.019  | 0.250±0.001   | 0.017  | 0.341±0.019  | 0.311±0.0004  | 0.001  |
| 髌韧带力/(BW)      | 13.053±0.177 | 3.921±0.010   | <0.001 | 6.352±0.172  | 3.308±0.004   | <0.001 | 6.236±0.079  | 3.313±0.004   | <0.001 |
| 胫骨近端向前剪切力/(BW) | 1.220±0.018  | 0.444±0.001   | <0.001 | 0.557±0.020  | 0.241±0.001   | <0.001 | 0.801±0.013  | 0.484±0.001   | <0.001 |
| 矢状面负荷/N        | 2568.1±22.2  | 370.2±1.0     | <0.001 | 2439.4±51.1  | 193.8±1.0     | <0.001 | 2047.1±22.0  | 502.1±0.8     | <0.001 |
| 非矢状面负荷/N       | 202.8±17.3   | 67.8±0.5      | <0.001 | 114.5±9.7    | 81.6±0.3      | <0.001 | 502.1±17.4   | 80.9±0.4      | <0.001 |

注:BW,body weight,体重;BH,body height,身高。

表4 蒙特卡罗模拟女性排球运动员 ACL 损伤与未损伤试跳下肢运动生物力学特征

Tab.4 Lower extremity biomechanics of injured and non-injured trials for female volleyball players with Monte Carlo simulation

| 参数             | 变向跑          |              |        | 急停起跳         |              |        | 垂直落地         |              |        |
|----------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|
|                | 损伤           | 未损伤          | P      | 损伤           | 未损伤          | P      | 损伤           | 未损伤          | P      |
| 膝关节屈角/(°)      | 15.8±0.1     | 22.3±0.02    | <0.001 | 14.0±0.2     | 28.7±0.03    | <0.001 | -3.1±0.9     | 13.7±0.01    | <0.001 |
| 小腿倾角/(°)       | -4.5±0.1     | -4.7±0.01    | <0.001 | -3.4±0.2     | -7.8±0.02    | <0.001 | 9.7±0.4      | 6.2±0.01     | <0.001 |
| COP 到踝水平距离/m   | 0.058±0.001  | 0.067±0.0002 | <0.001 | 0.005±0.001  | 0.027±0.0001 | <0.001 | 0.111±0.003  | 0.122±0.0001 | <0.001 |
| 水平向后 GRF/(BW)  | 0.806±0.005  | 0.401±0.0004 | <0.001 | 1.113±0.011  | 0.378±0.001  | <0.001 | 0.498±0.015  | 0.263±0.0003 | <0.001 |
| 垂直 GRF/(BW)    | 0.280±0.025  | 0.596±0.003  | <0.001 | 2.069±0.027  | 0.732±0.002  | <0.001 | 0.644±0.032  | 0.417±0.001  | <0.001 |
| 膝内翻力矩/(BH·BW)  | -0.010±0.001 | -0.001±0.001 | <0.001 | 0.018±0.001  | 0.014±0.001  | <0.001 | 0.018±0.001  | 0.014±0.001  | <0.001 |
| 膝内旋力矩/(BH·BW)  | 0.002±0.0001 | 0.002±0.0001 | <0.001 | 0.001±0.0001 | 0.001±0.0001 | 0.096  | 0.003±0.0003 | 0.002±0.0001 | <0.001 |
| 膝伸展力矩/(BH·BW)  | 0.257±0.001  | 0.081±0.0002 | <0.001 | 0.287±0.003  | 0.074±0.0002 | <0.001 | 0.129±0.004  | 0.057±0.0001 | <0.001 |
| 股后肌肌力/(BW)     | 0.973±0.004  | 0.991±0.001  | <0.001 | 1.162±0.024  | 1.177±0.002  | 0.078  | 0.401±0.030  | 0.371±0.001  | 0.012  |
| 腓肠肌肌力/(BW)     | 0.323±0.001  | 0.325±0.001  | <0.001 | 0.328±0.005  | 0.325±0.001  | 0.072  | 0.466±0.026  | 0.402±0.001  | <0.001 |
| 髌韧带力/(BW)      | 9.306±0.042  | 3.506±0.005  | <0.001 | 10.426±0.108 | 3.453±0.007  | <0.001 | 5.000±0.129  | 2.358±0.003  | <0.001 |
| 胫骨近端向前剪切力/(BW) | 0.798±0.004  | 0.349±0.001  | <0.001 | 0.980±0.013  | 0.273±0.001  | <0.001 | 0.604±0.021  | 0.306±0.001  | <0.001 |
| 矢状面负荷/N        | 1961.8±7.9   | 443.0±1.0    | <0.001 | 2211.4±10.7  | 252.8±1.0    | <0.001 | 1832.5±27.2  | 435.8±0.7    | <0.001 |
| 非矢状面负荷/N       | 203.5±3.3    | 140.4±0.7    | <0.001 | 59.6±3.2     | 38.1±0.2     | <0.001 | 159.5±4.9    | 64.4±0.1     | <0.001 |

注:BW,body weight,体重;BH,body height,身高。

平向后 GRF、膝关节伸展力矩、髌韧带力、胫骨向前剪切力及矢状面负荷 ( $P<0.001$ );急停起跳时,表现出更小的膝关节屈角、足跟着地的落地方式 ( $P<0.001$ );在急停起跳落地中,则表现为小腿前倾、垂直 GRF、膝关节内旋力矩及矢状面负荷更大的方式 ( $P<0.001$ )。女子排球运动员变向跑时,相比其他动作具有更大的非矢状面负荷 ( $P<0.001$ );急停起跳动作比其他动作表现出足

跟着地、GRF 更大的特征;垂直落地则具有更小的膝关节屈角、小腿前倾以及更大的膝关节内旋力矩、伸展力矩、髌韧带力、胫骨向前剪切力和矢状面负荷 ( $P<0.001$ )。

### 3 讨论

本文结果表明,男女排球运动员 ACL 损伤危险因素受动作的影响,不同动作对 ACL 损伤的影响也



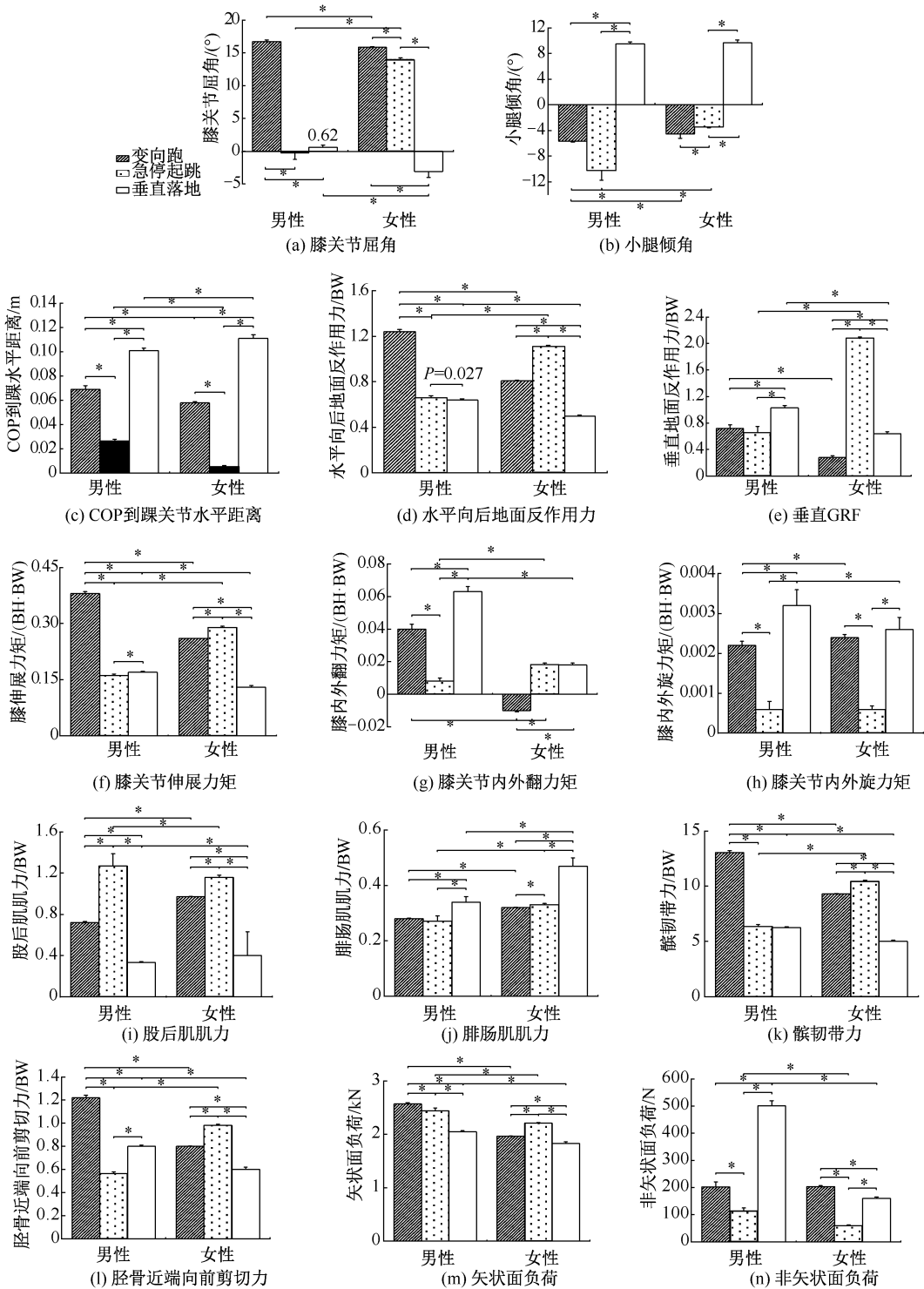
图 1 性别和动作对损伤试跳下肢运动生物力学参数的影响 (\*  $P < 0.001$ )

Fig.1 Effects of gender and maneuvers on lower extremity biomechanics of simulated injured trials (a) Knee flexion angle, (b) Tibial tilting angle, (c) COP to ankle horizontal distance, (d) Posterior GRF, (e) Vertical GRF, (f) Knee extension moment, (g) Knee external and internal valgus moment, (h) Knee external and internal rotation moment, (i) Hamstring muscle force, (j) Gastrocnemius muscle force, (k) Patellar tendon force, (l) Proximal tibial anterior shear force, (m) Sagittal plane loading, (n) Non-sagittal plane loading

因性别而具有差异。

### 3.1 损伤与未损伤试跳下 ACL 损伤的生物力学特征分析

不论男女,排球运动员损伤试跳较非损伤试跳膝关节屈角小、伸展力矩大,这与以往研究结果一致<sup>[24-25]</sup>。排球运动员小腿趋于前倾和足跟着地方式,会增加膝关节外部弯曲力矩,进而引起膝关节内部伸展力矩及股四头肌收缩增加,导致 ACL 负荷增大<sup>[21,26]</sup>。损伤试跳时,水平向后 GRF 更大<sup>[11,14]</sup>。McNair 等<sup>[27]</sup>研究指出,跳箱落地时,垂直 GRF 与胫骨向前剪切力呈显著正相关,并可能增加 ACL 负荷,这与本文的垂直落地动作结果一致。Lin 等<sup>[15]</sup>研究发现,小腿后倾时,膝关节中心处于 COP 后方,此时垂直 GRF 可以产生外部膝关节弯曲力矩,在一定程度上可以解释变向跑时垂直 GRF 对 ACL 损伤的影响。研究还发现,GRF 较大并非 ACL 损伤必要因素,其与小腿倾角有关。此外,膝关节内翻力矩大,ACL 损伤危险性大,而膝关节内旋力矩对 ACL 负荷的敏感度和贡献较低,内旋力矩的离散程度对损伤危险性的影响可能更突出<sup>[14-16]</sup>。股后肌和腓肠肌对 ACL 损伤的影响与膝关节屈角有关。Yu 等<sup>[28]</sup>研究发现,当男女膝关节屈角分别小于 15°和 20°时,股后肌和腓肠肌收缩能够增加 ACL 张力,本文结果在一定程度上支持该结论。当屈角大于 20°时,肌肉收缩可能对 ACL 具有一定的保护作用<sup>[29]</sup>。

综上所述,矢状面负荷是排球运动员 ACL 损伤的主要危险机制,膝关节内翻力矩是造成非矢状面负荷的主要因素,但其贡献低于矢状面负荷。

### 3.2 损伤试跳下性别和动作对 ACL 损伤危险因素的影响

结果显示,损伤试跳中急停变向跑时男子比女子排球运动员着地时具有更大的膝关节屈角、小腿后倾角以及 COP 到踝关节距离。而女子运动员着地时所受水平向后 GRF 更小,则更容易由于较大的膝关节外部弯曲力矩所需对应的膝关节伸展力矩。此外,女子排球运动员具有更小的垂直 GRF,进而胫骨向前剪切力高于男子运动员。有研究报道,膝关节内翻力矩会增加 ACL 损伤负荷。本研究中,男子排球运动员表现为内翻力矩,女子运动员则表现出外翻力矩。此外,膝关节内外旋力矩对 ACL 损伤的影响有限,这与以往研究结果一致<sup>[14-16]</sup>。进一

步,损伤试跳下男女排球运动员矢状面负荷分别达到 ACL 损伤负荷的(114±1)%和(109±4)%,而非矢状面负荷男女排球运动员分别达到相应性别 ACL 损伤临界值的(9±1)%和(11±0.2)%。该结果也说明矢状面负荷是 ACL 损伤的主要危险机制,而单独的非矢状面负荷并不能造成 ACL 损伤<sup>[24]</sup>。

急停起跳时,女子排球运动员比男子更易由于膝关节屈角(14.04°±0.23° vs. -0.27°±0.98°)引起 ACL 损伤。而男子排球运动员比女子倾向于通过小腿前倾、足跟着地、GRF 以及膝关节外翻力矩增加损伤风险。Neilson 等<sup>[30]</sup>通过 Meta 分析得出,通过减小膝关节和髌关节屈角以及垂直 GRF,能够降低 ACL 负荷,但对额状面生物力学特征无影响。Yang 等<sup>[31]</sup>指出,大学生排球运动员干预训练后,男子运动员急停起跳时膝关节屈角增大,但是对男子运动员变向跑及女子运动员变向跑和急停起跳动作的膝关节屈角和 GRF 均无影响,该结果在一定程度上验证了本研究中男女排球运动员在急停起跳和变向跑 ACL 损伤危险因素具有差异的结论。此外,股后肌和腓肠肌肌力不是女子排球运动员完成急停起跳时的损伤危险因素,但对男子运动员损伤有影响,这可能是由于女子运动员落地时不能如男子运动员一样有效地利用肌肉收缩<sup>[32]</sup>。

本研究认为,完成垂直落地动作时,男子排球运动员由于膝关节屈角小而使 ACL 损伤风险增大,而女子排球运动员则主要由于足跟着地、GRF 较大、膝关节内翻力矩和伸展力矩增大而使 ACL 负荷增大。Hughes 等<sup>[33]</sup>研究大学生排球运动员拦网落地动作得出,女子排球运动员比男子垂直 GRF 大,膝关节伸展力矩、膝关节外翻力矩也更大,这与本研究结果一致<sup>[10]</sup>。

值得注意的是,与男子相比,女子运动员急停起跳时 ACL 损伤危险因素少且仅为膝关节屈角,但通过模拟得到的女子排球运动员急停起跳时损伤例数为(756±24)次,约为男子[(36±4)次]的 21 倍。类似的垂直落地时,男子排球运动员损伤危险因素为膝关节屈角,比女子运动员损伤因素少,但模拟得到男女排球运动员该动作的 ACL 损伤率分别为(218±13)、(46±7)次。这在一定程度上说明膝关节屈角对排球运动员 ACL 损伤影响较大。综上所述,排球运动员 ACL 损伤危险因素受性别和动

作的交互影响。根据研究结果,本文建议,不论男女,着地时以增大膝关节屈曲为重点,男子排球运动员还需要在完成急停或变向跑时避免小腿前倾、足跟着地以及大的GRF,女子还应该强调着地时以小的GRF作为软着陆方式,以期降低排球运动员ACL损伤风险。

本研究存在以下局限性:①采用逆向动力学方法时并未考虑个体差异,同时得到的参数为净力、净力矩,考虑了GRF和惯性力联合作用结果,但由于无法测量拮抗肌的收缩力,关节净力可能会与实际关节力具有差异;②选取ACL损伤的阈值会受到实验对象年龄、种族、运动状态、健康状态等多种因素的影响,故研究结果可能与实际ACL损伤存在一定的差异。③模型中没有详细的运动学参数来描述非矢状面的运动情况,这也可能会影响正确地认识非矢状面受力对ACL负荷的作用。

## 4 结论

(1)变向跑时,男子运动员可能由于膝关节屈角小、小腿前倾以及足跟着地增加ACL负荷;而女子运动员则倾向于大的GRF和膝关节伸展力矩,使其损伤风险增加。

(2)急停起跳时,女子排球运动员主要由于较小的膝关节屈角导致ACL损伤;而男子运动员损伤危险因素更丰富,包括小腿前倾、足跟着地、GRF较大、膝关节外翻力矩和伸展力矩增加等。然而女子比男子排球运动员急停起跳时ACL损伤风险更大。

(3)垂直落地时,女子排球运动员ACL损伤危险因素主要是较大GRF、膝关节外翻和伸展力矩以及足跟着地等;较小的膝关节屈角是男子排球运动员ACL损伤的主要危险因素。男子排球运动员比女子垂直落地时ACL损伤率更高。

## 参考文献:

[1] 谢恩礼,詹建国,常云.基于科学计量学方法的前交叉韧带损伤预防生物力学研究[J].医用生物力学,2016,31(2):171-176.  
XIE EL, ZHAO JG, CHANG Y. Biomechanical research on prevention of anterior cruciate ligaments based on scientometrics [J]. J Med Biomech, 2016, 31(2): 171-176.

[2] AGEL J, ROCKWOOD T, KLOSSNER D. Collegiate ACL injury rates across 15 sports: National collegiate athletic

association injury surveillance system data update (2004-2005 through 2012-2013) [J]. Clin J Sport Med, 2016, 26(6): 518-523.

[3] ZAHRADNIK D, JANDACKA D, HOLCAPEK M, et al. Blocking landing techniques in volleyball and the possible association with anterior cruciate ligament injury [J]. J Sports Sci, 2017, 36(8): 955-961.

[4] GANS I, RETZKY JS, JONES LC, et al. Epidemiology of recurrent anterior cruciate ligament injuries in National Collegiate Athletic Association Sports: The injury surveillance program, 2004-2014 [J]. Orthop J Sports Med, 2018, 6(6): 2325967118777823

[5] LOSCIALE JM, ZDEB RM, LEDBETTER L, et al. The association between passing return-to-sport criteria and second anterior cruciate ligament injury risk: A systematic review with meta-analysis [J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2019, 49(2): 43-54.

[6] 郝卫亚.运动损伤生物力学研究[J].医用生物力学,2017,32(4):299-306.  
HAO WY. The research on biomechanics of sports injuries [J]. J Med Biomech, 2017, 32(4): 299-306.

[7] 张玲,蔡宗远,王少白,等.前交叉韧带重建术后膝关节运动分析研究进展[J].医用生物力学,2020,35(2):240-246.  
ZHANG L, CAI ZY, WANG SB, et al. Progress in knee joint motion analysis after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. J Med Biomech, 35(2): 240-246.

[8] BEARDT BS, MCCOLLUM MR, HINSHAW TJ, et al. Lower-extremity kinematics differed between a controlled drop-jump and volleyball-takeoffs [J]. J Appl Biomech, 2018, 34(4): 327-335.

[9] CHAPPELL JD, YU B, KIRKENDALL DT, et al. A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks [J]. Am J Sports Med, 2002, 30(2): 261-267.

[10] HUGHES G, WATKINS J, OWEN N. Differences between the sexes in knee kinetics during landing from volleyball block jumps [J]. Eur J Sport Sci, 2010(1): 1-11.

[11] HEWETT TE, MYER GD, FORD KR, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study [J]. Am J Sports Med, 2005, 33(4):492-501.

[12] GOETSCHIUS J, SMITH HC, VACEK PM, et al. Application of a clinic-based algorithm as a tool to identify female athletes at risk for anterior cruciate ligament injury: A prospective cohort study with a nested, matched case-control analysis [J]. Am J Sports Med, 2012,40(9): 1978-1984.

[13] SINSURIN K, VACHALATHITI R, JALAYONDEJA W, et al. Altered peak knee valgus during jump-landing among

- various directions in basketball and volleyball athletes [J]. J Sports Med, 2013, 4(3): 195-200.
- [14] ZAHRADNIK D, JANDACKA D, UCHYTIL J, *et al.* Lower extremity mechanics during landing after a volleyball block as a risk factor for anterior cruciate ligament injury [J]. Phys Ther Sport, 2015, 16(1): 53-58.
- [15] LIN CF, GROSS M, JI C, *et al.* A stochastic biomechanical model for risk and risk factors of non-contact anterior cruciate ligament injuries [J]. J Biomech, 2009, 42(4): 418-423.
- [16] 李翰君, 刘卉, 张美珍, 等. 确定前交叉韧带损伤概率及危险因素随机生物力学模型与模拟[J]. 体育科学, 2014, 34(12): 37-43.
- [17] 康孟珍, 曾衍钧, 杨海军. 单层红细胞聚集的分形蒙特卡洛模拟[J]. 医用生物力学, 1999, 14(3): 134-137.  
KANG MZ, ZENG YJ, YANG HJ. Fractal Montecarlo simulation of Mono-Lattice RBC's aggregation [J]. J Med Biomech, 1999, 14(3): 134-137.
- [18] PFLUM MA, SHELBURNE KB, TORRY MR, *et al.* Model prediction of anterior cruciate ligament force during drop-landings [J]. Med Sci Sports Exerc, 2004, 36(11): 1949-1958.
- [19] LOBIETTI R, COLEMAN S, PIZZICHILLO E, *et al.* Landing techniques in volleyball [J]. J Sports Sci, 2010, 28(13): 1469-1476.
- [20] ZAHRADNIK D, JANDACKA D, FARANA R, *et al.* Identification of types of landings after blocking in volleyball associated with risk of ACL injury [J]. Eur J Sport Sci, 2017, 17(2): 241-248.
- [21] 刘卉, 张美珍, 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.
- [22] 张美珍, 刘卉, 李翰君, 等. 侧切和急停起跳对篮球运动员前交叉韧带运动生物力学特征的影响[J]. 北京体育大学学报, 2015, 38(4): 65-70.
- [23] BODEN BP, DEAN GS, FEAGIN JA JR, *et al.* Mechanisms of anterior cruciate ligament injury [J]. Orthopedics, 2000, 23(6): 573-578.
- [24] YU B, GARRETT WE. Mechanisms of non-contact ACL injuries [J]. Br J Sports Med, 2007, 41(Suppl 1): 47-51.
- [25] ZAHRADNIK D, JANDACKA D, FARANA R, *et al.* Identification of types of landings after blocking in volleyball associated with risk of ACL injury [J]. Eur J Sport Sci, 2016, 17(2): 241-248.
- [26] BURKHART B, FORD KR, MYER GD, *et al.* Anterior cruciate ligament tear in an athlete: Does increased heel loading contribute to ACL rupture? [J]. N Am J Sports Phys Ther, 2008, 3(3): 141-144.
- [27] MCNAIR PJ, MARSHALL RN. Landing characteristics in subjects with normal and anterior cruciate ligament deficient knee joints[J]. Arch Phys Med Rehabil, 1994, 75(5): 584-589.
- [28] YU B, GARRETT W. Hamstring co-contraction does not necessarily reduce ACL loading [C]//Proceedings of ISB XXth Congress-ASB 29<sup>th</sup> Annual Meeting. Cleveland: [s.n.], 2019: 979.
- [29] O'CONNOR JJ. Can muscle co-contraction protect knee ligaments after injury or repair? [J]. J Bone Joint Surg Br, 1993, 75(1): 41-48.
- [30] NEILSON V, WARD S, HUME P, *et al.* Effects of augmented feedback on training jump landing tasks for ACL injury prevention: A systematic review and meta-analysis [J]. Phys Ther Sport, 2019, 39: 126-135.
- [31] YANG C, YAO W, GARRETT WE, *et al.* Effects of an intervention program on lower extremity biomechanics in stop-jump and side-cutting tasks [J]. Am J Sports Med, 2018, 46(12): 3014-3022.
- [32] SALCI Y, KENTEL BB, HEYCAN C, *et al.* Comparison of landing maneuvers between male and female college volleyball players [J]. Clin Biomech, 2004, 19(6): 622-628.
- [33] HUGHES G, WATKINS J. Lower limb coordination and stiffness during landing from volleyball block jumps [J]. Res Sports Med, 2008, 16(2): 138-154.