

# Research Progress in Biomechanics of Vertical Drop Jump

Bin Ma<sup>1\*</sup>, Di Xie<sup>1#</sup>, Huifang Chen<sup>2</sup>, Haimei Wang<sup>1</sup>, Tiantian Zhang<sup>1</sup>, Yudong Jia<sup>1</sup>, Xiaoming Li<sup>1</sup>, Haibin Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Sports Medicine and Rehabilitation, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences, Taian Shandong

<sup>2</sup>Department of Nursing, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences, Taian Shandong

Email: masportsr@163.com, #dxie@tsmc.edu.cn

Received: May 20<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 5<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 12<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Vertical drop jump is an important screening method for anterior cruciate ligament (ACL) injury. The analysis of vertical drop jump is helpful to elucidate the mechanism of ACL injury, to screen the high-risk population of ACL injury. In order to determine the influencing factors of ACL injury during vertical drop jump, the biomechanical research of vertical drop jump was summarized from the aspects of gender, drop mode, height and aerial target, and the effects of fatigue and intervention on biomechanics of knee joint were discussed. It is important to explore the mechanism of ACL injury by analyzing the vertical drop jump, to construct the prevention program of ACL injury, and to provide a theoretical basis for the application of vertical drop jump on the risk screening of ACL injury.

## Keywords

Vertical Drop Jump, Anterior Cruciate Ligament, Biomechanical

# 垂直落地反跳生物力学的研究进展

马彬<sup>1\*</sup>, 谢地<sup>1#</sup>, 陈卉芳<sup>2</sup>, 王海妹<sup>1</sup>, 张甜甜<sup>1</sup>, 贾毓栋<sup>1</sup>, 李晓铭<sup>1</sup>, 刘海斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东第一医科大学(山东省医学科学院)运动医学与康复学院, 山东 泰安

<sup>2</sup>山东第一医科大学(山东省医学科学院)护理学院, 山东 泰安

Email: masportsr@163.com, #dxie@tsmc.edu.cn

收稿日期: 2020年5月20日; 录用日期: 2020年6月5日; 发布日期: 2020年6月12日

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 马彬, 谢地, 陈卉芳, 王海妹, 张甜甜, 贾毓栋, 李晓铭, 刘海斌. 垂直落地反跳生物力学的研究进展[J]. 临床医学进展, 2020, 10(6): 989-996. DOI: 10.12677/acm.2020.106150

## 摘要

垂直落地反跳是前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤的重要筛查方法。对垂直落地反跳动作的分析有利于阐明ACL损伤机制并有助于筛选ACL损伤高危人群。为确定垂直落地反跳时前交叉韧带损伤的影响因素,本文从性别、落地方式、起始高度、空中目标方面对垂直落地反跳的生物力学研究进行综述并探讨疲劳、干预对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响。通过分析垂直落地反跳动作探讨ACL损伤机制,对于构建ACL损伤预防方案具有重要意义,并为垂直落地反跳用于前交叉韧带损伤风险筛查提供理论依据。

## 关键词

垂直落地反跳, 前交叉韧带, 生物力学

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来随着全民健身概念的提出,运动损伤的发生率逐年提高,而前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤是最常见的运动损伤之一[1] [2] [3]。ACL损伤是体育运动中的一个重要问题,它会给受伤的运动员带来严重的后果,包括运动时间的损失和运动成绩的下降,甚至造成运动生涯的终止,长期的后果可能更严重,会造成早期骨关节炎的风险增加,膝关节功能下降,疼痛等[4]。有研究表明,ACL损伤中,非接触性ACL损伤所占比例最大[5] [6] [7],而损伤的非接触性表明绝大多数ACL损伤是可以预防的[8]。ACL损伤的发生率可通过神经肌肉训练预防项目降低50% [9]。周长敬等[3]对ACL损伤的预防方法进行了系统化综述,结果表明预防损伤的方法多种多样,训练效果却大不相同,针对具体的人群进行相应的训练,效果可能会更好。因此,ACL损伤筛查是极其重要的,筛查出易伤人群,对他们进行针对性的训练是必要的。针对性的训练可以有效的降低ACL损伤发生率和运动员在赛场或者运动中的损伤风险。

ACL损伤风险筛查的方法多种多样;Donohue等[10]对单腿落地,单腿下蹲,双腿落地,双腿下蹲四种方式是否可预测ACL损伤风险进行了研究,发现当使用不同的任务进行筛选时,个体可能会表现出不同筛查特征,双腿落地应该被认为是筛查的重点。双腿落地是导致ACL损伤的最常见原因之一,在之前的研究中,不论是否有双腿落地后的跳跃,双腿落地常被用来评估膝关节外展的神经肌肉控制能力。Ishida等[11]研究落地测试和垂直落地反跳测试,发现女性受试者在进行垂直落地反跳时落地的初始阶段有更大外翻角度,垂直落地反跳时膝关节外展角度峰值和外展力矩明显大于落地测试,表明垂直落地反跳测试与落地测试相比有利于筛查ACL的损伤。Fidai等[12]对男女性运动员进行垂直落地反跳测试发现,运动增加了运动员的膝关节外翻,这可能提示垂直落地反跳测试是一种低成本和可重复的筛选工具,可用于识别ACL损伤的高危运动员。很多研究通过运动时表现出的生物力学特点来评估有ACL损伤风险的运动生物力学特征,预测运动损伤风险。这些生物力学特点包括髌膝关节屈曲的角度过小,髌关节的内收、内旋,膝关节的外翻角度过大,外旋角度过大,膝关节过伸,屈伸肌峰值力矩比值小等是造成ACL损伤的风险因素[13] [14] [15]。此外,神经肌肉控制是通过激活关节周围的动态稳定结构来实现关节的动

态稳定,当神经肌肉控制不足或者肌肉力量下降时,容易造成各种损伤的发生[16]。针对性的神经肌肉训练来控制骨盆和髋部的运动,可以避免地面反作用力和膝关节外展力矩过大造成的 ACL 损伤[17]。垂直落地反跳(vertical drop jump, VDJ)是一种常用的评估膝关节神经肌肉控制、运动能力和负荷的方法并被广泛用于研究,以确定运动员 ACL 损伤的风险[18] [19]。了解垂直落地反跳动作的生物力学特点对有效筛选出高风险运动员非常重要,本文采用“垂直落地反跳(Vertical Drop Jump, VDJ)”、“膝关节(knee)”、“前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)”“生物力学(biomechanics)”等检索词在中国知网和 PUBMED 数据库进行组合检索,主要关注 2015 年至今中英文垂直落地反跳的膝关节生物力学研究。对性别、落地方式、起始高度、空中目标方面对垂直落地反跳的生物力学研究进行综述并探讨疲劳、干预对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响。该综述将提供可以在实验室环境中识别的、损伤风险系数高的动作表现出的证据特点,对临床医生、教练员、运动筛查高风险运动员,以及平时训练和赛场竞技指导都具有重要意义。

## 2. 性别对垂直落地反跳动作生物力学指标的影响

女性较男性 ACL 损伤有较高的发生率[20] [21],且女性运动员非接触性 ACL 损伤的发生率是男性运动员的 4 到 6 倍[22] [23]。Schilaty 等[24]将垂直落地反跳测试动力学数据输入到标本冲击模拟器中,模拟男性女性在落地过程中韧带的张力,发现在相同的加载条件下,女性标本初始接触地面、触地后 ACL 应力比男性大,最大应力差至少为 3.5%,表明在落地过程中,与男性相比,女性发生 ACL 紧张的风险增加。Briem 等[25]对青年运动员进行垂直落地反跳测试,发现女性较男性有更大的垂直地面反作用力,且右侧肢体峰值高于左侧,表明男女性落地时采取不同的运动策略。Arundale 等[26]探讨男性与女性足球运动员进行垂直落地反跳动作的差异,研究发现垂直落地反跳的动作中男性的不对称性更大,但女性落地时外翻角度更大,髋关节屈曲角度较小,且较多比例的女性膝关节的控制比男性更差。Holden 等[27]评估青少年男性和女性运动员在青少年生长突增期间的垂直落地反跳运动学变化,发现随时间的增加男性膝关节屈曲角度大于女性,但在整个时间段内女性表现出更大的膝关节外翻,青少年男女运动员在成长和发展过程中表现出不同的运动学特征。在垂直落地反跳落地过程中膝关节外翻角度达到最大值时,无论是膝关节还是髋关节最大屈曲角度,女性的都比男性小,这表明女性在落地过程中相较男性有更大的损伤风险。从多数的研究来看,在垂直落地反跳动作中,女性较男性的外翻角度大、垂直地面反作用力大,这可能是造成女性 ACL 损伤发生率更高的重要原因,因此垂直落地反跳动作测试可能更适合筛选女性 ACL 损伤的风险。

## 3. 落地方式对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响

Leppanen 等[28]对年轻女性运动员进行垂直落地反跳测试探讨髋、膝、踝关节矢状面生物力学与 ACL 损伤的关系,与未受伤运动员相比,发现 ACL 损伤的女性运动员落地时髋关节屈曲角度较小,且膝关节屈曲力矩峰值较大,表明在髋关节屈曲度较小和膝关节屈曲力矩峰值较大的情况下落地,ACL 损伤风险增加。增加膝关节和髋关节屈曲角度以产生软着陆,可以减少年轻女运动员膝关节负荷和 ACL 损伤的风险。以较小的髋关节和膝关节屈曲时落地,在刚开始接触地面的时刻会显著增加中间和后部的肌肉激活( $p < 0.001$ );在峰值时刻,与外侧肌肉激活显著相关( $p = 0.001$ ),且股外侧肌活动占主导地位[29]。有研究探讨年轻女子运动员垂直落地反跳运动的生物力学特征与 ACL 损伤的关系发现,僵硬的落地、较小的膝关节弯曲和较大的地面反作用力与 ACL 损伤的风险增加有关[30]。Augustsson 等[31]对 18 名受试者进行垂直落地反跳研究发现,采用膝关节屈曲角度较小的方式落地,膝关节外翻角度越大,ACL 损伤风险越大,因此,在使用垂直落地反跳动作测试确定 ACL 损伤风险时,要考虑落地的方式。以软着陆的垂直落地反

跳动作的落地方式,了解关节之间的受力特点对于预防损伤发生以及降低损伤风险非常重要,僵硬的落地可能对 ACL 损伤风险更大。

#### 4. 起始高度对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响

落地的高度是评估垂直落地反跳运动中膝关节所承受负担时要考虑的一个重要因素,不同的落地高度会产生不同的落地策略[32] [33]。Wang 等[34]分析在垂直落地反跳动作中,随着落地高度的增加下肢生物力学指标的变化是否存在性别差异,结果显示随着高度的增加,女性垂直地面反作用力的峰值显著增加,在落地过程中,踝、膝和髌关节的角位移随着下降高度的增加而显著增加,这些变化将导致女性 ACL 的损伤风险增大。Lesinski 等[35]研究垂直落地反跳动作中落地的高度和地面的条件对膝关节生物力学的影响,发现以 60 cm 高度落在较不稳定的平面上(平衡垫)相较于 40 cm 高度落地有较大的膝关节屈曲的角速度和外翻角度;以高度>40 cm 落在较不稳定的平面上,可能会因膝关节外翻应力增大而增加受伤的风险。有研究将从 30 cm, 40 cm, 50 cm 高度台面进行垂直落地反跳测试的结果进行了比较,发现最大髌部屈曲和膝关节屈曲角度会随落地高度的增加而增加,动力学结果表明,垂直地面反作用力、关节力矩和功率随高度的增加而增大[32]。Peng 等[36]评估从不同高度跳下时,髌膝踝关节的垂直地面反作用力、冲量的差异,结果表明落地高度为 150%最大垂直跳跃高度不推荐作为高强度的刺激,会增加损伤的风险。Struzik 等[37]研究腓绳肌与股四头肌肌电活动量的比值与垂直落地反跳变量之间的关系,发现随着落地高度的增加腓绳肌与股四头肌肌电活动量的比值也随之增加。在垂直落地反跳动作中,较高的高度表现出的生物力学指标特点往往预示着膝关节的损伤风险更大。

#### 5. 空中目标对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响

Almonroeder 等[38]研究探讨垂直落地反跳过程中空中目标对下肢生物力学指标的影响,结果显示与标准的垂直落地反跳任务相比,空中目标会产生更高的垂直地面反力峰值和更低的膝屈曲角度,更大的膝外展角,在执行垂直下落跳跃任务时,施加空中目标影响了下肢的生物力学,增加了 ACL 的负荷。Ford 等[39]比较空中目标和虚拟目标对垂直落地反跳生物力学的影响发现虚拟目标组有较大的髌伸肌力矩,空中目标组受试者的躯干屈曲幅度小,表明虚拟目标可以优化跳跃高度,促进增加髌部和躯干屈曲。有研究表明,与无空中目标相比,在高空目标条件下获得了更高的垂直跳跃高度和最大膝关节屈曲力矩,表明空中目标可以在训练和测试方案中纳入,以改变下肢生物力学,并可以提高运动功能[40]。从当前研究来看,空中目标的影响还存在争议。Mok 等[41]探讨女性优秀手球足球运动员垂直落地反跳任务中,头顶目标对跳跃高度与下肢生物力学的影响,发现空中目标增加了 5.8%的跳跃高度,但是所有的运动学和动力学的变化都是不显著的,因此,一个间接的目标不太可能改变精英女性手球和足球运动员的生物力学指标。在进行垂直落地反跳的过程中,空中目标可能对下肢的生物力学指标产生一定的影响,但关于空中目标对垂直落地反跳的影响还需进一步研究。

#### 6. 疲劳对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响

疲劳已被证明会影响落地的生物力学并增加 ACL 损伤的风险。Dickin 等[32]研究垂直落地反跳动作的落地高度和疲劳对生物力学的影响,发现与疲劳前相比,疲劳后膝关节最大外翻角度和地面反作用力增大,疲劳会对落地过程中动力学和运动学指标产生影响,并将膝关节置于增加 ACL 损伤风险的位置。Lazaridis 等[42]对比了疲劳前后垂直落地反跳过程中下肢的三维运动学、动力学和肌电图(electromyogram, EMG)参数,发现疲劳会导致运动能力的急剧下降和跳跃时运动控制的变化。Haddas 等[43]采用垂直落地反跳研究下肢疲劳对周期性下腰痛患者膝关节运动学、动力学、膝周肌肉电活动的影响,发现在肢体疲



劳后, 初始接触地面时膝关节外展角度减小, 膝关节屈曲力矩增大, 且半腱肌、多裂肌、臀大肌和股直肌的活动延迟。Fidai 等[12]通过垂直落地反跳测试探讨疲劳是否会增加青少年运动员的膝关节动态外翻, 发现 49%的运动员在垂直落地反跳运动中动态外翻增加; 疲劳后高危等级运动员的百分比明显高于疲劳前中高危等级运动员的百分比, 女性和年龄>15 岁的运动员受疲劳影响最大, 疲劳水平与膝关节动态外翻增加有关, 这可能使运动员面临更大的 ACL 损伤风险。运动疲劳与 ACL 损伤的风险密切相关, 在 ACL 损伤预防方案中应考虑疲劳这一影响因素, 以识别和加强垂直落地反跳运动中可改变的危险因素, 减少 ACL 损伤的风险。

## 7. 干预对垂直落地反跳运动中膝关节生物力学指标的影响

有研究表明 ACL 损伤生物力学和神经肌肉危险因素是可以通过训练干预来改变的[44] [45]。Taylor 等[46]采用垂直落地反跳评估 6 周的 ACL 损伤预防计划对膝关节外翻力矩的变化, 实验组在日常训练前进行每周 2~3 次、共 6 周的损伤预防训练; 对照组进行常规体育训练, 结果发现实验组膝关节外翻力矩有变化者与无变化者相比, 在落地过程中髌关节内翻偏移增加, 且膝关节屈曲角度和力矩、外翻角度有很大程度的改善, 表明该训练计划针对有受伤风险的人进行个性化训练可能会降低 ACL 损伤风险。Hopper 等[47]研究 6 周的神经肌肉训练对年轻女子网球运动员的影响, 受试者进行垂直落地反跳测试收集训练前后下肢的三维运动学和垂直地面反作用力, 结果表明实验组落地过程中通过改善膝关节屈伸活动度, 增加了膝关节外旋角, 减少了额平面膝关节外展运动以及垂直地面反作用力; 对照组在 6 周的训练期间没有表现出任何显著变化, 表明 6 周的神经肌肉干预项目可以改善女性网球运动员 ACL 损伤相关的生物力学指标。Nyman 等[48]探讨 4 周的视觉反馈训练对垂直落地反跳运动学的影响, 实验组进行训练后增加了膝关节屈曲峰值, 视觉反馈训练显著改善了垂直落地反跳的运动学, 表明视觉反馈训练在临床环境中降低非接触性 ACL 损伤的可能性。但也有训练干预效果不明显, Arundale 等[49]研究在两个足球赛季中使用损伤预防项目时髌关节和膝关节的生物力学变化, 运动员在赛季前和赛季后进行垂直落地反跳的运动分析发现该计划没有改善膝关节损伤相关的生物力学危险因素, 双侧矢状面和冠状面髌关节运动也没有任何变化。Lagas 等[50]通过垂直落地反跳评估神经肌肉训练项目是否可以降低青少年足球运动员的膝关节负荷, 对照组进行常规训练, 实验组进行 12 周的神经肌肉训练, 结果表明经过 12 周的训练, 两组的膝关节负荷均有所下降; 与常规训练相比, 有针对性的神经肌肉训练在减少青少年男性足球运动员的膝关节负荷方面没有明显的效果。干预对垂直落地反跳的影响可针对较年轻的运动员, 使用训练有素的实训人员, 并在整个运动赛季中进行下肢力量练习, 关注落地稳定可降低 ACL 损伤[51]。

## 8. 小结

ACL 的损伤是多因素的, 垂直落地反跳作为 ACL 损伤的筛查方法, 性别、落地时髌膝关节的角度、起始高度, 空中目标都会对垂直落地反跳的过程产生影响, 减小肌肉疲劳, 增强膝关节周围的肌肉力量, 选择合适的干预项目对于降低 ACL 损伤具有重要意义。现有研究具有一定的局限性, 但仍建议根据现有的基础建立合适的运动模型。运动模式的建立对于检测膝关节生物力学和 ACL 损伤之间的重要联系是有价值的, 这有助于制定更好的损伤预防方案[52]。膝关节是人体最重要的关节之一, 预防损伤是降低 ACL 受损的重要方法。通过现有的研究基础, 探索多因素之间的内在联系, 建立合适的运动模型, 对筛查出易伤人群, 降低 ACL 损伤具有重要意义, 且为垂直落地反跳用于 ACL 损伤风险筛查提供理论依据。

## 致 谢

该论文的完成, 首先要感谢我的指导老师谢地老师的悉心教学, 感谢他在写论文期间为我提供了

深切的帮助,在论文的选题、修改,撰写等各种细节方面给予细致详尽的指导。在此,我还要感谢陈卉芳、李晓铭、刘海斌老师的耐心指导,感谢研究生王海妹、张甜甜、贾毓栋的热情帮助,查找资料。最后向一直全力教导和培养我的运动医学与康复学院领导老师表达我最诚挚的敬意!衷心祝愿山东第一医科大学(山东省医学科学院)未来更加美好。再一次对帮助过我的老师和同学们表示感谢!

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(81472143)。

## 参考文献

- [1] 杨新格. 青少年足球运动员损伤风险筛查方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京体育大学, 2019.
- [2] 张美珍, 刘德林, 孙文文, 等. 随机生物力学模拟比较不同落地形式对篮球运动员 ACL 损伤危险性和危险因素的影响[J]. 天津体育学院学报, 2017, 32(3): 245-251.
- [3] 周长敬, 刘卉, 李翰君, 等. 前交叉韧带损伤预防手段研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(1): 82-90.
- [4] Krosshaug, T., Steffen, K., Kristianslund, E., *et al.* (2016) The Vertical Drop Jump Is a Poor Screening Test for ACL Injuries in Female Elite Soccer and Handball Players: A Prospective Cohort Study of 710 Athletes. *American Journal of Sports Medicine*, **44**, 874-883. <https://doi.org/10.1177/0363546515625048>
- [5] Staynor, J.M.D., Nicholas, J.C., Weir, G., *et al.* (2017) Targeting Associated Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Community-Level Athletes. *Sports Biomechanics*, **16**, 501-513. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1246597>
- [6] Hideyuki, K., Atsuo, N., Yosuke, S., *et al.* (2010) Mechanisms for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries: Knee Joint Kinematics in 10 Injury Situations from Female Team Handball and Basketball. *The American Journal of Sports Medicine*, **38**, 2218-2225. <https://doi.org/10.1177/0363546510373570>
- [7] Kobayashi, H., Kanamura, T., Koshida, S., *et al.* (2010) Mechanisms of the Anterior Cruciate Ligament Injury in Sports Activities: A Twenty-Year Clinical Research of 1,700 Athletes. *Journal of Sports Science and Medicine*, **9**, 669-675.
- [8] Griffin, L.Y., Albohm, M.J., Arendt, E.A., *et al.* (2006) Understanding and Preventing Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries: A Review of the Hunt Valley II Meeting, January 2005. *American Journal of Sports Medicine*, **34**, 1512-1532. <https://doi.org/10.1177/0363546506286866>
- [9] Myer, G.D., Sugimoto, D., Thomas, S., *et al.* (2013) The Influence of Age on the Effectiveness of Neuromuscular Training to Reduce Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Athletes: A Meta-Analysis. *American Journal of Sports Medicine*, **41**, 203-215. <https://doi.org/10.1177/0363546512460637>
- [10] Donohue, M.R., Ellis, S.M., Heinbaugh, E.M., *et al.* (2015) Differences and Correlations in Knee and Hip Mechanics during Single-Leg Landing, Single-Leg Squat, Double-Leg Landing, and Double-Leg Squat Tasks. *Research in Sports Medicine*, **23**, 394-411. <https://doi.org/10.1080/15438627.2015.1076413>
- [11] Ishida, T., Koshino, Y., Yamanaka, M., *et al.* (2018) The Effects of a Subsequent Jump on the Knee Abduction Angle during the Early Landing Phase. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **19**, 379. <https://doi.org/10.1186/s12891-018-2291-4>
- [12] Fidai, M.S., Okoroha, K.R., Meldau, J., *et al.* (2020) Fatigue Increases Dynamic Knee Valgus in Youth Athletes: Results from a Field-Based Drop-Jump Test. *Arthroscopy*, **36**, 214-222.e2. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2019.07.018>
- [13] Abdolhamid, D., Nader, R., Halim, M.A., *et al.* (2013) Bilateral and Unilateral Asymmetries of Isokinetic Strength and Flexibility in Male Young Professional Soccer Players. *Journal of Human Kinetics*, **36**, 45-53. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0005>
- [14] Alentorn-Geli, E., Myer, G.D., Silvers, H.J., *et al.* (2009) Prevention of Non-Contact Anterior Cruciate Ligament Injuries in Soccer Players. Part 1: Mechanisms of Injury and Underlying Risk Factors. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **17**, 705-729. <https://doi.org/10.1007/s00167-009-0813-1>
- [15] Cheung Roy, T.H., Smith, A.W. and Wong, D.P. (2012) H:Q Ratios and Bilateral Leg Strength in College Field and Court Sports Players. *Journal of Human Kinetics*, **33**, 63-71. <https://doi.org/10.2478/v10078-012-0045-1>
- [16] 郑荣强, 周静怡. 非接触性前交叉韧带损伤的生物力学风险评估及预防[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(24): 3919-3924.
- [17] Ueno, R., Navacchia, A., Dicesare, C.A., *et al.* (2020) Knee Abduction Moment Is Predicted by Lower Gluteus Medius Force and Larger Vertical and Lateral Ground Reaction Forces during Drop Vertical Jump in Female Athletes. *Journal of Biomechanics*, **103**, Article ID: 109669. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109669>

- [18] Cesar, G.M., Tomasevicz, C.L. and Burnfield, J.M. (2016) Frontal Plane Comparison between Drop Jump and Vertical Jump: Implications for the Assessment of ACL Risk of Injury. *Sports Biomechanics*, **15**, 440-449. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1174286>
- [19] Mok, K.M., Petushek, E. and Krosshaug, T. (2016) Reliability of Knee Biomechanics during a Vertical Drop Jump in Elite Female Athletes. *Gait Posture*, **46**, 173-178. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.03.003>
- [20] 孙文文. 青少年篮球运动员完成急停起跳时与 ACL 损伤相关的下肢运动学特征分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [21] 张美珍, 郭浩, 刘瑞瑞, 等. 前交叉韧带损伤的研究热点解析[J]. 体育研究与教育, 2019, 34(1): 7-13+97.
- [22] Markus, W., Martin, H., Jonas, W., et al. (2011) The Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Injury in Football (Soccer, a Review of the Literature from a Gender-Related Perspective. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, **19**, 3-10. <https://doi.org/10.1007/s00167-010-1172-7>
- [23] Schilaty, N.D., Christopher, N., Bates, N.A., et al. (2017) Incidence of Second Anterior Cruciate Ligament Tears and Identification of Associated Risk Factors from 2001 to 2010 Using a Geographic Database. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, **5**, Article ID: 2325967117724196. <https://doi.org/10.1177/2325967117724196>
- [24] Schilaty, N.D., Bates, N.A., Nagelli, C.V., et al. (2018) Sex-Based Differences of Medial Collateral Ligament and Anterior Cruciate Ligament Strains with Cadaveric Impact Simulations. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, **6**, 2325967118765215. <https://doi.org/10.1177/2325967118765215>
- [25] Briem, K., Jonsdottir, K.V., Arnason, A., et al. (2017) Effects of Sex and Fatigue on Biomechanical Measures during the Drop-Jump Task in Children. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, **5**, 2325967116679640. <https://doi.org/10.1177/2325967116679640>
- [26] Arundale, A.J.H., Kvist, J., Hagglund, M., et al. (2019) Jump Performance in Male and Female Football Players. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **28**, 606-613. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05747-1>
- [27] Holden, S., Doherty, C., Boreham, C., et al. (2019) Sex Differences in Sagittal Plane Control Emerge during Adolescent Growth: A Prospective Investigation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **27**, 419-426. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5069-1>
- [28] Leppanen, M., Pasanen, K., Krosshaug, T., et al. (2017) Sagittal Plane Hip, Knee, and Ankle Biomechanics and the Risk of Anterior Cruciate Ligament Injury: A Prospective Study. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, **5**, 2325967117745487. <https://doi.org/10.1177/2325967117745487>
- [29] Malfait, B., Dingenen, B., Smeets, A., et al. (2016) Knee and Hip Joint Kinematics Predict Quadriceps and Hamstrings Neuromuscular Activation Patterns in Drop Jump Landings. *PLoS ONE*, **11**, e0153737. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153737>
- [30] Leppanen, M., Pasanen, K., Kujala, U.M., et al. (2017) Stiff Landings Are Associated with Increased ACL Injury Risk in Young Female Basketball and Floorball Players. *American Journal of Sports Medicine*, **45**, 386-393. <https://doi.org/10.1177/0363546516665810>
- [31] Augustsson, S.R., Tranberg, R., Zugner, R., et al. (2018) Vertical Drop Jump Landing Depth Influences Knee Kinematics in Female Recreational Athletes. *Physical Therapy in Sport*, **33**, 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2018.08.002>
- [32] Dickin, D.C., Johann, E., Wang, H., et al. (2015) Combined Effects of Drop Height and Fatigue on Landing Mechanics in Active Females. *Journal of Applied Biomechanics*, **31**, 237-243. <https://doi.org/10.1123/jab.2014-0190>
- [33] Ford, K.R., Myer, G.D., Schmitt, L.C., et al. (2011) Preferential Quadriceps Activation in Female Athletes with Incremental Increases in Landing Intensity. *Journal of Applied Biomechanics*, **27**, 215-222. <https://doi.org/10.1123/jab.27.3.215>
- [34] Wang, I.L., Wang, S.Y. and Wang, L.I. (2015) Sex Differences in Lower Extremity Stiffness and Kinematics Alterations during Double-Legged Drop Landings with Changes in Drop Height. *Sports Biomechanics*, **14**, 404-412. <https://doi.org/10.1080/14763141.2015.1062129>
- [35] Lesinski, M., Prieske, O., Beurskens, R., et al. (2018) Effects of Drop-Height and Surface Instability on Jump Performance and Knee Kinematics. *International Journal of Sports Medicine*, **39**, 50-57. <https://doi.org/10.1055/s-0043-117610>
- [36] Peng, H.T., Khuat, C.T., Kernozek, T.W., et al. (2017) Optimum Drop Jump Height in Division III Athletes: Under 75% of Vertical Jump Height. *International Journal of Sports Medicine*, **38**, 842-846. <https://doi.org/10.1055/s-0043-114011>
- [37] Struzik, A. and Pietraszewski, B. (2019) Relationships between Hamstrings-to-Quadriceps Ratio and Variables Describing Countermovement and Drop Jumps. *Applied Bionics and Biomechanics*, **2019**, Article ID: 4505481. <https://doi.org/10.1155/2019/4505481>

- [38] Almonroeder, T.G., Kernozek, T., Cobb, S., *et al.* (2018) Cognitive Demands Influence Lower Extremity Mechanics during a Drop Vertical Jump Task in Female Athletes. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, **48**, 381-387. <https://doi.org/10.2519/jospt.2018.7739>
- [39] Ford, K.R., Nguyen, A.D., Hegedus, E.J., *et al.* (2017) Vertical Jump Biomechanics Altered with Virtual Overhead Goal. *Journal of Applied Biomechanics*, **33**, 153-159. <https://doi.org/10.1123/jab.2016-0179>
- [40] Ford, K.R., Myer, G.D., Smith, R.L., *et al.* (2005) Use of an Overhead Goal Alters Vertical Jump Performance and Biomechanics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, **19**, 394-399. <https://doi.org/10.1519/00124278-200505000-00026>
- [41] Mok, K.M., Bahr, R. and Krosshaug, T. (2017) The Effect of Overhead Target on the Lower Limb Biomechanics during a Vertical Drop Jump Test in Elite Female Athletes. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **27**, 161-166. <https://doi.org/10.1111/sms.12640>
- [42] Lazaridis, S., Patikas, D.A., Bassa, E., *et al.* (2018) The Acute Effects of an Intense Stretch-Shortening Cycle Fatigue Protocol on the Neuromechanical Parameters of Lower Limbs in Men and Prepubescent Boys. *Journal of Sports Sciences*, **36**, 131-139. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1287932>
- [43] Haddas, R., Hooper, T., James, C.R., *et al.* (2016) Volitional Spine Stabilization during a Drop Vertical Jump from Different Landing Heights: Implications for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Journal of Athletic Training*, **51**, 1003-1012. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.12.18>
- [44] Donnell-Fink, L.A., Kristina, K., Collins, J.E., *et al.* (2015) Effectiveness of Knee Injury and Anterior Cruciate Ligament Tear Prevention Programs: A Meta-Analysis. *PLoS ONE*, **10**, e0144063. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144063>
- [45] Nedergaard, N.J., Dalbo, S., Petersen, S.V., *et al.* (2019) Biomechanical and Neuromuscular Comparison of Single- and Multi-Planar Jump Tests and a Side-Cutting Maneuver: Implications for ACL Injury Risk Assessment. *The Knee*, **27**, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2019.10.022>
- [46] Taylor, J.B., Nguyen, A.D., Shultz, S.J., *et al.* (2018) Hip Biomechanics Differ in Responders and Non-Responders to an ACL Injury Prevention Program. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **28**, 1236-1245. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5158-1>
- [47] Hopper, A.J., Haff, E.E., Joyce, C., *et al.* (2017) Neuromuscular Training Improves Lower Extremity Biomechanics Associated with Knee Injury during Landing in 11-13 Year Old Female Netball Athletes: A Randomized Control Study. *Frontiers in Physiology*, **8**, 883. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00883>
- [48] Nyman, E. and Armstrong, C.W. (2015) Real-Time Feedback during Drop Landing Training Improves Subsequent Frontal and Sagittal Plane Knee Kinematics. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, **30**, 988-994. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.06.018>
- [49] Arundale, A.J.H., Silvers-Granelli, H.J., Marmon, A., *et al.* (2018) Changes in Biomechanical Knee Injury Risk Factors across Two Collegiate Soccer Seasons Using the 11+ Prevention Program. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **28**, 2592-2603. <https://doi.org/10.1111/sms.13278>
- [50] Lagas, I.F., Meuffels, D.E., Visser, E., *et al.* (2019) High Knee Loading in Male Adolescent Pre-Professional Football Players: Effects of a Targeted Training Programme. *Journal of Science and Medicine in Sport*, **22**, 164-168. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.06.016>
- [51] Petushek, E.J., Sugimoto, D., Stoolmiller, M., *et al.* (2019) Evidence-Based Best-Practice Guidelines for Preventing Anterior Cruciate Ligament Injuries in Young Female Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Sports Medicine*, **47**, 1744-1753. <https://doi.org/10.1177/0363546518782460>
- [52] Mok, K.M. and Leow, R.S. (2016) Measurement of Movement Patterns to Enhance ACL Injury Prevention—A Dead End? *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, **5**, 13-16. <https://doi.org/10.1016/j.asmart.2016.06.003>