

人体运动过程中侧切落地模式和角度对下肢运动生物力学的影响

https://doi.org/10.12307/2021.222

周文星, 王琳

投稿日期: 2020-09-27

送审日期: 2020-09-28

采用日期: 2020-11-09

在线日期: 2021-01-18

中图分类号:

R459.9; R496; R318

文章编号:

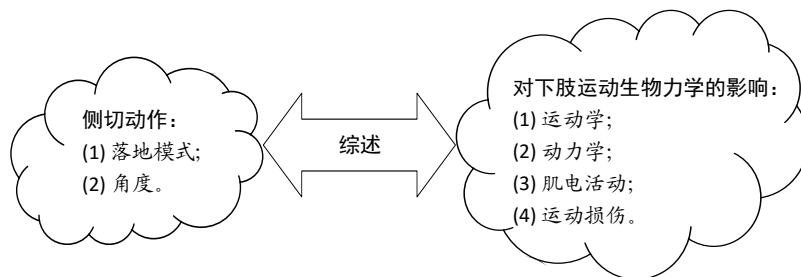
2095-4344(2021)32-05184-07

文献标识码: A

文章快速阅读:

文章特点一

△从运动学、动力学、肌电活动、运动损伤发生率等方面分析了侧切落地模式和角度对下肢运动生物力学的影响。



文题释义:

侧切动作: 是篮球、足球、排球运动中常见的进攻动作,需要在有限的空间内快速减速,并快速地改变方向来闪避对手的防守,最后再加速进攻的过程。

落地模式: 根据足初始接触地面部位的不同,可分为后足落地模式、中足落地模式、前足落地模式。后足落地模式指的是足跟初始接触地面;中足落地模式指的是跖骨和足跟同时接触地面;前足落地模式指的是跖骨初始接触地面。

摘要

背景: 在体育运动中,侧切动作是最常见的进攻技术,受落地模式和角度的影响。侧切落地模式和角度的不同会增加下肢膝关节损伤的风险。

目的: 阐述侧切动作中不同的落地模式和角度对下肢运动生物力学的影响。

方法: 在PubMed、WOS、CNKI数据库检索2020年8月之前收录的相关研究。中文搜索词为“侧切动作;侧切角度;侧切落地模式;侧切生物力学”“变向动作”;英文检索词为“cutting maneuver; cutting maneuver angle; cutting foot strike; cutting biomechanics”“change-of-direction”。

结果与结论: 采用后足落地模式和较大的角度进行侧切时所表现出的生物力学指标特点,预示着前交叉韧带损伤风险的加大。但是目前的研究只集中于单一因素的分析,很少把落地模式和侧切的角度结合起来进行讨论,这两者在侧切动作中的交互作用,缺少明确的结论,尚无足够证据支持侧切角度增大时改变落地模式会降低下肢损伤的风险,这仍需要大量的研究进行深入论证。

关键词: 侧切动作;侧切落地模式;侧切角度;运动学;动力学;生物力学;运动损伤

缩略语: 地面反作用力冲量: ground reaction force impulse, GRI

Effect of side cutting foot strike pattern and angle on the biomechanics of lower extremities

Zhou Wenxing, Wang Lin

School of Sports Science, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China

Zhou Wenxing, Master candidate, School of Sports Science, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China

Corresponding author: Wang Lin, MD, Professor, School of Sports Science, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China

Abstract

BACKGROUND: In sports, side cutting is the most common attacking technique, which is influenced by landing mode and angle. The different patterns and angles of side cutting during landing may increase the risk of knee injury in the lower limbs.

OBJECTIVE: To explain the impact of different foot strike patterns and angles in side cutting on the biomechanics of the lower extremity.

METHODS: PubMed, Web of Science, and CNKI databases were searched for relevant studies published before August 2020. The keywords were “cutting

上海体育学院运动科学学院, 上海市 200438

第一作者: 周文星, 女, 1995年生, 上海市人, 汉族, 上海体育学院在读硕士, 主要从事运动康复研究。

通讯作者: 王琳, 博士, 教授, 上海体育学院运动科学学院, 上海市 200438

https://orcid.org/0000-0001-7383-8515 (周文星)

基金资助: 国家自然科学基金(11572202), 项目负责人: 王琳

引用本文: 周文星, 王琳. 人体运动过程中侧切落地模式和角度对下肢运动生物力学的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(32):5184-5190.



maneuver; cutting maneuver angle; cutting foot strike; cutting biomechanics; change-of-direction” in Chinese and English, respectively.
RESULTS AND CONCLUSION: The use of rear-foot strike patterns and larger angles for side cutting indicates an increased risk of anterior cruciate ligament injury. However, the current research only focuses on the analysis of foot strike patterns or larger angles alone, and rarely combines the foot strike patterns with the angle of side cutting. There is no clear conclusion about the interaction between foot strike patterns and angles in the side cutting, and there is not enough evidence to support that changing the foot strike pattern when the side cut angle increases will reduce the risk of lower extremity injury, which still requires a lot of research for in-depth demonstration.

Key words: side cutting; cutting foot strike pattern; cutting angle; kinematics; kinetics; biomechanics; sports injury

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 11572202(to WL)

How to cite this article: ZHOU WX, WANG L. Effect of side cutting foot strike pattern and angle on the biomechanics of lower extremities. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(32):5184-5190.

0 引言 Introduction

侧切动作是人体在运动过程中快速改变方向,完成成功的多方位运动的关键,同时也是评价运动动作技能的重要指标^[1-3]。据统计,在一次足球、篮球等球类比赛中,侧切动作出现的频率高达100多次^[4-5]。

侧切动作可以分为3个阶段,是一个在有限的空间内短时间的减速,改变方向,再加速的过程^[2, 6-7]。在短时间内减速加速是执行侧切动作的关键因素,它主要包括两个要素:首先,质心(the centre of mass, COM)必须在临近侧切方向时减速,然后朝向新的方向加速(质心的速度偏移);其次,身体必须向新的方向进行旋转(身体旋转)^[2]。之前的研究也表明,侧切的减速阶段是通过将身体质心置于压力中心(the center of pressure, COP)后方,并产生向后的地面反作用力(ground reaction force, GRF)和地面反作用力冲量(ground reaction force impulse, GRI)来实现的^[4]。身体的转向阶段是指质心从压力中心分离到新的方向,从而产生向内侧的地面反作用力的过程^[5, 8-9]。

研究表明,在执行侧切动作时人体会承受体质量3倍的冲击力,这些冲击力会产生一个瞬间的加速度峰值,并通过人体下肢肌肉骨骼系统向上传导。高冲击力的加速度可能导致下肢韧带的过度负荷,从而增加下肢关节损伤的风险^[10]。执行侧切动作时,最常见的损伤部位是膝关节,其中非接触性前交叉韧带损伤占膝关节损伤的20%,并且在球类运动的比赛中,前交叉韧带损伤率为每1000 h 3.7次^[11],因此侧切动作已经被认为是非接触性前交叉韧带损伤的主要因素之一^[1]。

侧切的角度、侧切的落地模式、侧切的速度及准备时间等可以影响在执行侧切动作时人体的生物力学,进而可能与非接触性前交叉韧带的损伤有着一定的联系。已有研究表明,在进行侧切时,不同的落地模式会对膝关节产生不同的负荷^[12]。并且侧切的角度与膝关节的峰值力矩也有着密切的联系,是前交叉韧带损伤的潜在风险因素^[1]。因此,侧切的落地模式以及侧切的角度是研究人员在探究侧切动作的生物力学机制时必须考虑的重要因素。文章从上述两方面探讨了侧切时生物力学以及相应的神经肌肉调控变化,总结了国内外在该领域的最新研究文献,为进一步的研究提供理论依据。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源 由第一作者在PubMed、WOS、CNKI数据库检索2020年8月之前收录的相关研究。中文检索词为“侧切动作;侧切角度;侧切落地模式;侧切生物力学”“变向动作”;

英文检索词为“cutting maneuver; cutting maneuver angle; cutting foot strike; cutting biomechanics”“change-of-direction”。

1.2 入选标准

1.2.1 纳入标准 ①中文或英文文献 ②实验性或系统性研究 ③侧切动作对下肢运动生物力学的影响; ④侧切落地模式对下肢运动生物力学影响的相关文献; ⑤侧切角度对下肢运动生物力学影响的相关文献。

1.2.2 排除标准 ①重复文献; ②与研究目的不相符的文献; ③缺乏可靠性的文献; ④与侧切动作无关的文献; ⑤全文内容不全面的文献; ⑥侧切动作应用于其他领域的文献。

1.3 质量评价及数据提取 共检索到文献2318篇,其中中文文献209篇,英文文献2109篇。通过阅读文献标题、摘要,排除重复文献,初筛后得到255篇文献;排除与研究目的不相符、和全文内容不全面的文献,剩余81篇;然后由资料收集者筛选出可靠性较高的文献,最终纳入66篇文献,见图1。

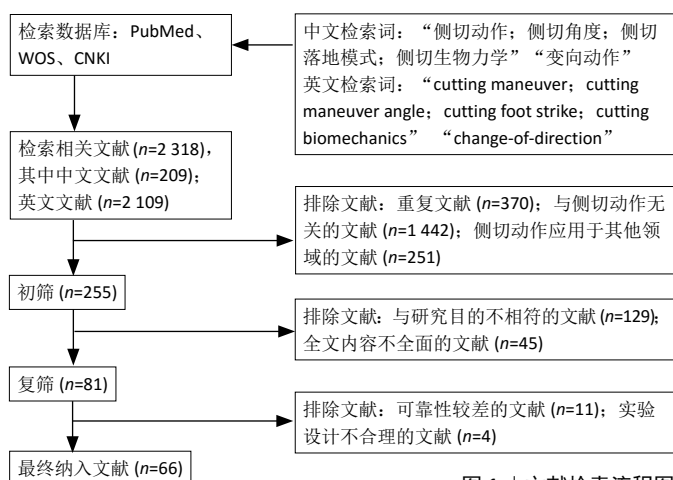


图1 | 文献检索流程图

2 结果 Results

2.1 侧切落地模式和侧切角度对下肢运动生物力学的影响 见表1, 2。

2.2 不同落地模式和角度对于侧切运动学的影响

2.2.1 落地模式 根据足初始接触地面的部位不同,可以将侧切的落地模式分为3种:后足落地模式、中足落地模式、前足落地模式(图2)。由于在体育运动中,采用中足落地模式的人群较少,所以大多数研究只针对后足和前足落地模式的人群进行研究^[12-13]。落地模式对于侧切动作运动学的影响研究主要集中于下肢的髌关节、膝关节和踝关节的角度特征等方面。

已有研究发现,采用前足落地模式的运动者踝关节在初始触地时发生快速跖屈,并伴随膝关节外旋,而采用后足落

表 1 | 侧切落地模式对下肢运动生物力学的影响

纳入研究	n	侧切角度 (°)	生物力学指标
DAVID 等 ^[11] , 2017	50	90	前足: 膝关节外翻角度↑; 膝关节触地外翻力矩↑ 后足: 膝关节屈曲角度↑; 膝关节屈曲、外翻、内旋峰值力矩↑; VGRF↑
CORTES 等 ^[12] , 2012	20	45	前足: 膝关节触地屈曲角度↑; 膝关节内收力矩↑; PGRF↑; VGRF↑ 后足: 髌关节触地屈曲角度↑; 膝关节触地外翻角度↑; 髌关节、膝关节屈曲峰值角度↑
DONNELLY 等 ^[13] , 2017	19	45	前足: 膝关节触地外展角度↑; 踝关节触地跖屈角度↑; 踝关节背屈关节活动范围↑; 踝关节峰值跖屈力矩↑; 踝关节能量吸收↑; 踝关节做功↑ 后足: 髌关节触地屈曲角度↑; 膝关节触地内旋角度↑; 踝关节外翻角度↑; 膝关节屈曲、外展力矩↑; 踝关节内收、内旋力矩↑; 踝关节能量吸收↑; 踝关节做功↑
YOSHIDA 等 ^[14] , 2015	11	45	触地前 50 ms 肌电活动: 前足: 股二头肌↑; 半腱肌↑; 腓肠肌外侧头↑ 触地后 50 ms 肌电活动: 前足: 股二头肌↑; 腓肠肌外侧头肌肉↑; 胫前肌↓ 后足: 膝关节的外翻力矩↑; 胫骨内旋力矩↑; 压力中心↑
OGASAWARA 等 ^[15] , 2020	24	60	后足→前足
林宇峰等 ^[16] , 2014	20	45, 180	45°: 前足: 膝关节外翻角度↓; 膝关节内收力矩↑ 180°: 前足: 膝关节外翻角度↑; 膝关节内收力矩↑

表注: VGRF 为垂直地面反作用力; PGRF 为后侧的地面反作用力; →表示由后足落地转换成前足落地; ↑表示增大; ↓表示减小

表 2 | 侧切角度对下肢运动生物力学的影响

纳入研究	n	侧切角度 (°)	生物力学指标
HAVENS 等 ^[4] , 2015	25	45, 90	减速阶段: PGRI↑; PGRF↑ 转向阶段: MLGRI↑; MLCOM-COP↑ 膝关节外翻力矩↑
HAVENS 等 ^[7] , 2015	25	45, 90	减速阶段: 接近速度↓; 髌关节、膝关节触地屈曲角度↓; 踝关节触地跖屈角度↑; 髌关节矢状面位移↓; 膝关节和踝关节位移↑; 髌关节伸展和踝关节跖屈力矩↓; 踝关节能量吸收↓; 踝关节能量吸收↑ 转向阶段: 髌关节外展角度↑; 触地时躯干倾斜角度↑; 髌关节内收力矩↑; 骨盆旋转↑
SCHREURS 等 ^[18] , 2017	29	45, 90, 135, 180	膝关节屈曲力矩↓; 膝关节外翻力矩↑; 垂直地面反作用力↓; 完成时间↑; 接近速度↓
SIGWARD 等 ^[19] , 2015	44	45, 110	骨盆旋转角度↑; 髌关节外展角度↑; 髌关节内旋角度↓; 膝关节外翻力矩↑; 地面反作用力↑
CORTES 等 ^[20] , 2011	19	45, 180	膝关节屈曲角度↓; 膝关节外翻角度↑; PGRF↑; 膝关节内翻峰值力矩↑
SCHOT 等 ^[21] , 1995	126	45, 90	制动力↑; 推动力↑; 垂直力↓

表注: PGRI 为后侧的地面反作用力冲量; PGRF 为后侧的地面反作用力; MLGRI 为内外侧方向的地面反作用力冲量; MLCOM-COP 为内外侧质心与压力中心的距离; ↑表示增大; ↓表示减小

地模式的运动者在初始触地时踝关节发生背屈, 同时伴随膝关节内旋^[12,13]。YOSHIDA 等^[14]发现, 与采用后足落地模式相比, 在进行 60° 侧切时, 采用前足落地模式的手球运动女性膝关节外翻角度更小。与前足落地模式的运动者相比, 采用后足落地模式的运动者在初始触地后, 具有较小的踝关节背屈和外旋活动度, 较小的膝关节屈曲活动度, 较大的膝关节外展

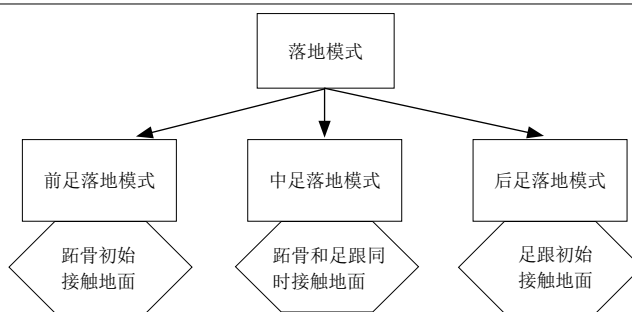


图 2 | 落地模式的分型

和内旋活动度, 较大的髌关节屈曲活动度^[11-14], 并且表现出更多朝向侧切方向的骨盆旋转^[2]。膝关节屈曲活动度的减少会导致前交叉韧带承受较大的负荷^[1, 16, 22]。前足落地可增加膝关节的屈曲角度, 从而避免膝关节处于过度外翻的位置^[12]。

膝关节的外翻被认为是前交叉韧带损伤的最主要因素^[14]。因此 BODEN 等^[23]指出, 在初始触地时踝关节背屈 (后跟着地) 可能是前交叉韧带损伤的高风险因素。在人体快速改变运动方向的过程中, 膝关节动态的对位对线会导致前交叉韧带的应变能力和负荷发生变化。采用前足落地模式可以调整下肢的力线, 避免前交叉韧带损伤的发生。对侧切动作进行视频分析发现, 膝关节接近伸直的情况下伴随膝关节外翻是手球运动员前交叉韧带损伤的常见特征^[24]。采用前足的落地模式可以减少膝关节外翻活动度, 可能减少膝关节和前交叉韧带的负荷, 从而降低膝关节损伤发生的风险^[13-14, 25]。

2.2.2 不同角度 当侧切动作的主要目的是改变运动方向时, 在进行转向的过程中, 侧切角度不同会影响动作减速和再加速阶段人体的运动学^[4, 7, 17, 26], 进而影响膝关节的负荷^[7, 18-19]。有研究对不同侧切角度下人体的运动学进行了比较, HAVENS 和 SIGWARD^[17]比较了 45° 和 90° 侧切时的减速和再加速阶段人体运动学情况, 发现与 45° 侧切相比, 90° 侧切在减速阶段髌关节和膝关节的屈曲活动度减少, 踝关节跖屈活动度增大, 髌关节的矢状面位移减少, 膝关节和踝关节的位移增加; 在加速阶段观察到进行 90° 侧切时有较大的髌关节外展和骨盆旋转活动度, 以及在初始触地阶段躯干有较大的倾斜角度。

有研究也指出在加速阶段运动者为了完成较大角度的侧切动作时, 不仅会产生下肢的旋转, 还会预先旋转和侧屈他们的躯干使其更倾向于侧切方向^[17, 27], 从而减少膝关节矢状面上的负荷^[28-29]。MARSHALL 等^[30]发现, 在进行 75° 快速侧切时, 侧切动作的敏捷性与躯干的旋转具有很强的相关性, 这就更加强调当侧切角度增大时, 躯干旋转与侧屈朝向侧切方向的姿势调整的重要性^[17, 19, 31-32]。具备良好的躯干控制能力者, 无需膝关节外翻代偿也能经受起由于侧切造成的膝关节较高的外在负荷^[25, 29]。

以不同角度进行侧切时, 髌关节的外展和内旋活动度也存在差异。在侧切动作的初始触地阶段, 与 45° 侧切相比, 110° 侧切具有较高的髌关节外展活动度和较小的内旋活动度, 较大的髌关节外展有助于在进行更大角度侧切时身体重

心稳定的维持^[19]，但是较大的髌关节外展活动度也被认为是与膝关节外翻力矩相关的生物力学危险因素，同时也是非接触性前交叉韧带损伤的常见运动学特征之一^[31]。以较大角度进行侧切时，髌关节内旋活动度的减少可能与膝关节负荷的增加有关^[19]。

膝关节矢状面的运动学会随着侧切角度的变化而进行调整。SCHREURS等^[18]发现，当增加侧切角度时，受试者会降低膝关节的屈曲角度。CORTES等^[20]也发现，当向45°和180°进行侧切时，膝关节的平均屈曲角度由-53.9°转变为-41.2°，膝关节的屈曲角度减小。膝关节的屈曲角度越小，股四头肌对前交叉韧带的拉力就越大^[18, 33]。

侧切动作的角度也会影响侧切动作的临界速度。与进行45°侧切相比，运动者在进行90°侧切时，方向改变阶段具有更低的临界速度^[34]。一些研究发现在相同距离的条件下，以较大角度进行侧切的运动者初始速度较慢^[4, 17-18]。

2.2.3 总结 目前对于侧切落地模式对下肢运动影响的研究还较少，并且大部分研究集中于对膝关节运动学的探讨，对于运动链中髌、踝关节运动学的探讨还存在着不足。此外，对不同侧切角度下的运动学研究还不够完善，在一项研究中很少对所有不同的侧切角度进行全面的探讨。并且前足落地模式在不同侧切角度下的运动学尚不清楚，因此，需要进一步研究落地模式和侧切角度对于侧切运动学的影响。

2.3 不同落地模式和角度对于侧切动力学的影响

2.3.1 落地模式 采用前足和后足落地模式进行侧切的运动都具有其特定的动力学特征。与侧切采用前足落地模式相比，后足落地模式存在着一个冲击瞬态，即初始触地阶段的50 ms，垂直方向地面反作用力出现一个峰值^[13]。地面反作用力的急剧变化可能会增加膝关节周围组织损伤的风险^[35]。此外，有研究表明，后足落地模式的地面垂直反作用力是前足落地模式的3.4倍^[36]。采用后足落地模式时膝关节会产生外翻，吸收垂直方向上的地面反作用力^[22]。在侧切的初始触地阶段，后足落地模式具有较大的向后地面反作用力，这是通过增加胫骨的前剪切力来增加膝关节韧带结构的应变而产生的，这将导致胫骨向前移位，前交叉韧带的拉力增加^[12, 37]。

采用前足落地模式的运动者具有更高的踝关节跖屈力矩，更低的踝关节内收和内旋力矩，以及更低的膝关节外展峰值力矩；而采用后足落地模式的运动者膝关节具有更高的伸展力矩、外展力矩、外翻力矩和胫骨内旋力矩^[11-13, 15]。因此通过采用前足落地的方式可以帮助运动者更好地调整他们的下肢，减少冠状面的地面反作用力和力矩臂，从而降低膝关节的负荷^[25]。踝关节的生物力学也与执行侧切动作时的表现有关^[7, 15]，运动者可通过增加踝关节的跖屈力矩来提高运动表现^[13]。在侧切的不同阶段会产生不同的膝关节旋转力矩，前足落地模式在侧切完整过程中大约47%阶段，会产生膝关节外旋力矩，而后足落地模式在侧切的前18%阶段膝关节的外旋力矩会转变为内旋力矩^[11]。

有研究表明，当质心位于压力中心前方时，踝关节对于

水平速度的产生起着至关重要的作用^[38]。在方向改变的最后阶段，由于此时重心在朝向预定方向的脚前方，所以踝关节产生的功率和力量是非常重要的^[1]。前足落地模式与后足落地模式相比，踝关节的峰值功率显著上升，膝关节的峰值功率显著下降^[13]。在方向改变的过程中，采用前足落地模式的运动员髌关节做功较多，膝关节的做功较少^[13]，这可能是由于前足落地模式使骨盆朝向侧切方向进行了预旋转^[2, 13]。

落地模式的差异也致使受试者在减速、方向改变以及加速阶段能量的吸收情况发生了变化。DAVID等^[2]发现，采用前足落地模式的运动员，在侧切过程中，髌关节、膝关节和踝关节吸收的能量为21.2%，35.0%，43.8%；而采用后足落地模式的运动员，髌、膝和踝关节吸收的能量为26.6%，40.9%，32.5%。因此可得出结论，前足落地模式通过踝关节吸收更多的能量，从而降低了膝关节外展力矩和非矢状面的踝关节力矩；后足落地模式通过膝关节吸收更多的能量，使膝关节外展和屈曲力矩增加^[1-2, 13]。此外，在侧切动作方向改变的中期，使用后足落地模式具有更低的水平质心移动速度。降低质心移动速度是通过提高膝关节和髌关节屈曲活动度来实现的。前足落地模式具有较小的步宽，这可能是因为运用前足落地模式减少了改变方向阶段足与地面的接触时间^[2]。

2.3.2 不同角度 一些研究调查了不同侧切角度下的动力学特征。研究发现在矢状面上，与90°侧切相比，45°侧切具有较高的髌关节伸展力矩；在冠状面和水平面，45°侧切具有较低的髌关节内收力矩^[17]。矢状面上髌关节的增加参与是有利的，这种情况下可通过减少冠状面和水平面髌关节的运动从而降低膝关节的外翻力矩^[19, 39]。在不同侧切任务下，髌关节的作用也不相同。在90°侧切时，增加的髌关节内收力矩以及减少的髌关节冠状面和水平面能量的吸收可使其在冠状面上趋于稳定状态，相反的，在45°侧切时，由于髌关节矢状面和水平面产生的能量更大，髌关节此时起推动作用^[17, 32]。

髌关节力矩的变化与膝关节力矩的变化相关，有研究证实了随着侧切角度的增大，膝关节屈曲力矩降低，膝关节伸展力矩增加^[17-18]。此外，SIGWARD等^[19]还报道了不同侧切角度下膝关节的外翻力矩，110°侧切比45°侧切有高2.4倍的膝关节外翻力矩，这表明侧切角度越大对膝关节的依赖性就越高。膝关节外翻力矩的增加也与初始接触地面时峰值力的增加有关，并且较大的膝关节外翻力矩被认为是非接触前交叉韧带断裂的潜在危险因素^[18]。踝关节的跖屈可在减速过程中起吸收能量的作用，在减速阶段结束时出现峰值力矩。侧切角度增大时，踝关节的跖屈力矩降低^[17]，此时，踝关节吸收的能量降低，膝关节吸收的能量增加，所以踝关节损伤的风险降低，膝关节损伤的风险增加^[7, 32]。

在侧切的过程中，与45°相比，110°侧切具有更高的地面反作用力^[19]，产生更高的地面反作用力可能是由于侧切角度增大时需要更多的力将身体进行转向。部分研究也支持这一观点，SCHOT等^[21]发现，与45°侧切相比，90°侧切在减速和改变方向阶段需要更大的地面反作用力。并且垂直、前后、

内外方向的地面反作用力分别增加 21%，87%，227%^[28]，这表明侧切角度越大前后方向和内外方向的负荷比率就越大。地面反作用力也可预测膝关节外翻力矩，因为在执行侧切动作时产生的力会通过踝关节传导到膝关节，地面反作用力越大，膝关节外翻的力矩就越大^[7]。

在侧切减速阶段，90°侧切具有较高的向后方向的地面反作用力，地面反作用力的冲击也较大，并且减速阶段产生的向后方向的地面反作用力和冲量都大于转向阶段；相反，在进行 45°侧切时并无此发现，这可能是由于减速阶段产生的力平均分布在两足^[4, 32]。一些研究发现当进行 180°侧切时，在减速阶段会产生水平方向的制动力，此外有研究也发现在 60°和 135°侧切的减速阶段也会产生相当大的制动力^[40]。总体而言，在侧切时的制动力是由角度决定的，当侧切角度 $\leq 45^\circ$ 时，减速阶段的作用是受到限制的，但是当侧切角度 $\geq 60^\circ$ 时，则起到促进方向改变的作用^[4, 26, 29, 32, 40-45]。对于人体质心而言，在减速和方向改变阶段，身体质心位置和水平面的地面反作用力都随着侧切角度的增加而增加^[1, 4]。HAVENS 等^[4]研究发现，随着内外方向 GRI 的增大，重心与质心的距离也增大，这可能是因为运动者通过控制侧切时两腿之间的距离以及躯干旋转从而产生内外方向的力和冲击^[32]。

2.3.3 总结 已有的研究大多注重于对下肢关节力矩和地面高反作用力的探讨，对侧切过程中减速、改变方向和加速阶段的下肢关节峰值力的研究还较少，并且还没有研究系统探究不同的落地模式和侧切角度两者之间的动力学关系，因此未来还需要进一步探究不同的落地模式和侧切角度在不同阶段的动力学差异，以完善研究的不足之处。

2.4 不同落地模式和角度的肌电活动

2.4.1 落地模式 侧切落地模式的不同会对人体下肢肌肉活动产生明显影响。研究表明，在接触地面前的 50 ms，采用前足落地模式的运动者比后足落地模式的运动者踝关节跖屈肌（腓肠肌）的肌电活动更高^[22]。踝关节跖屈肌肉在接触地面前的预激活，可以吸收来自地面的冲击力^[22]。采用前足落地模式的运动者，触地后 50 ms 与触地前 50 ms 相比，腓肠肌的肌电活动仍然很高，但是此时胫前肌的肌电活动降低。这可能是由于采用前足落地模式可以通过增加腓肠肌的活动从而抑制胫前肌的活动。另外，踝关节跖屈时能有效减少胫骨的向前移动，这有利于促进膝关节的稳定^[22, 46]，所以前足落地模式可以通过增加腓肠肌的肌肉活动从而降低前交叉韧带损伤的风险。

采用前足落地模式的运动者与采用后足落地模式的运动者相比，在触地时具有更高的半腱肌和股二头肌的肌电活动，此时，身体的重心向前移动，脚跟离地，具有向前的地面反作用力^[22]。腓肠肌可通过限制胫骨向前移位来增加膝关节的动态稳定性^[47]。因此，腓肠肌的力量不足可能是前交叉韧带损伤的关键因素之一，研究也支持这一观点，在侧切过程中股二头肌的预激活较低的女性运动者，其非接触性前交叉韧带断裂的风险增加^[48]。MACWILLIAMS 等^[49]还发现，增强腓

绳肌的力量可以减轻前交叉韧带的负荷。股四头肌和腓绳肌的共同收缩可以增加关节的压力，促进膝关节的稳定^[50]。但是，股四头肌的单独收缩会增加前交叉韧带的张力^[51]。因此，在侧切动作中，激活股四头肌的同时增加腓绳肌的肌肉活动是非常重要的，通过腓绳肌的收缩可以减少股四头肌施加于前交叉韧带上的负荷^[52]。

2.4.2 不同角度 侧切时的肌肉活动与侧切的角度密切相关。一项研究发现，在侧切的减速-加速阶段，肌肉的离心收缩能力增强^[26, 53]。研究发现随着侧切角度增大，股外侧肌和股二头肌肌电活动增加^[26, 32]，股二头肌活动的增强有利于应对膝关节的内旋力矩^[54]。在减速的接触阶段，地面反作用力随着侧切角度的增大而增大，股四头肌的离心收缩有助于吸收来自外部的强大力量^[55-56]；在方向改变阶段，股四头肌的向心收缩能加快身体的转动^[56]。但是股四头肌的收缩会引起胫骨向前移位，增加前交叉韧带的张力^[57]。而在侧切的初始触地阶段，髌关节由屈曲到伸展，腓绳肌是髌关节伸展的主要动力来源，故此时腓绳肌的肌肉活动较高^[26, 57-58]。另外，腓绳肌的肌肉活动可以稳定膝关节，防止胫骨的向前移动，从而保护前交叉韧带，并且在侧切的冲击阶段，腓绳肌通过控制膝关节的稳定，减少身体重心的移动^[55, 59]。

综上所述，在侧切过程中，需要膝关节周围的屈肌群和伸肌群的共同收缩来抵抗膝关节所承受的外部负荷^[55]。侧切角度越大，膝关节屈肌群和伸肌群的肌肉活动就越大，因此运动者应致力于增强膝关节周围屈肌群和伸肌群的力量，特别是离心收缩时的力量^[31-32, 44, 60-61]，以利于膝关节在侧切的减速阶段吸收更大的力，以及承受更高的负荷^[7, 18-20, 32]。另外，提高下肢肌肉的牵伸能力可以帮助运动员产生更大的减速和加速的力与冲量^[31, 60]，这同时也是运动者在侧切动作中提升自身表现的决定因素^[31, 45]。

2.4.3 总结 腓绳肌和股四头肌的收缩对于侧切动作的执行起到了至关重要的作用，但是在现有的研究中，还缺少足够多的文献支持，并且样本含量相对较少，因此还需要进一步的研究来支持之一结果。

2.5 侧切动作的落地模式和角度对运动损伤的影响 对于侧切动作而言，其主要参与的运动包括足球、篮球、手球、排球等^[1]。在侧切过程中，引起损伤的因素有很多，其中包括内在因素和外在因素。内在因素包括人体生物力学的异常、性别、之前损伤的病史；外在因素包括侧切角度、速度、核心力量或者足的落地模式^[13, 18, 32, 39, 62]。外在因素的改变会导致内在因素产生适应性的变化，侧切的落地模式和角度会影响下肢力的传导以及生物力学的改变，进而造成损伤的发生率发生变化。有研究显示，侧切动作导致的非接触性前交叉韧带损伤的发生率为 70%^[11, 22, 63]，在美国，每年有 8 000-250 000 的受伤者^[52]。前交叉韧带损伤后，超过 50% 的运动者在 2 年的康复训练后不能恢复到相同的竞技水平^[64]。

如上所述，侧切动作的初始触地阶段下肢的矢状面关节角度和足的落地模式发现，采用后足落地模式会增加非

接触性前交叉韧带损伤的风险,而前足落地模式可以降低膝关节的负荷^[13]。此外,后足落地模式会导致下肢的刚度增加,削弱地面反作用力的能力减弱,从而导致膝关节的负荷增加^[11, 23, 25]。因此,采用后足落地模式的运动者的反复压力损伤发生率比采用前足落地模式的运动者高^[65]。不同的落地模式导致了下肢能量分布的不均衡,后足落地模式主要靠膝关节吸收外在的负荷,前足落地模式主要由踝关节吸收能量^[13],这与直线跑的结果一致,前足落地模式更适用于膝关节不稳定的运动者,而后足落地模式更适合踝关节不稳定的运动者^[11, 35]。运用前足的落地模式能够更好地保护前交叉韧带,并且还能通过增加踝关节的跖屈力矩提高运动者的灵活性^[1]。

不同角度的侧切具有不同的运动学和动力学特征。膝关节外翻力矩是前交叉韧带损伤的重要预测因子,与45°侧切相比,以更大的角度进行侧切时会产生更大的膝关节外翻力矩,因此侧切角度增大时,膝关节损伤的风险也会增加。为了降低损害的风险,应采取一系列的措施,例如,通过躯干向预定运动方向的旋转来帮助运动者提高侧切动作的灵活性,或者是在进行侧切动作时,给予口头指令,帮助运动者纠正其动作^[18]。

众多研究表明,采用后足落地模式以及侧切角度增大时会增大膝关节损伤的风险,因此建议在进行侧切动作时采用前足落地模式、较小的侧切角度,以减少膝关节的负荷。此外,通过增强式训练、抗阻训练、平衡训练等多种训练方法,可增强膝关节周围肌肉力量,促进股四头肌和腘绳肌的协同收缩,从而增加触地时膝关节的屈曲角度,进而对膝关节起到保护作用^[66]。然而目前的研究都集中于膝关节,对踝关节损伤风险的研究还较少,因此,今后的研究方向应注重于侧切对踝关节损伤风险的影响。

3 研究前景 Research prospects

在进行侧切动作运动时,为了克服外在的阻力,需要身体多个部位的配合,尤其是髋关节、膝关节和踝关节。而膝关节周围肌肉力量薄弱或不平衡,肌肉激活的延迟,运动学和动力学调整等神经肌肉控制能力的减弱,均会增加膝关节损伤的风险。目前在侧切动作中足的落地模式和侧切角度的研究有限,并且大多数研究只集中于单一因素的分析,结合现有的研究讨论仅发现较大的侧切角度和采用后足落地模式所表现出的生物力学指标特点,预示着前交叉韧带损伤风险的加大,但这两者在侧切动作中的交互作用,缺少明确的结论,尚无足够证据支持侧切角度增大时改变落地模式会降低下肢损伤的风险,这仍需要大量的研究进行深入论证。

目前在侧切动作中对落地模式和角度的生物力学研究有限,且研究不够全面:①现有的研究大多都集中于膝关节,对髋关节和踝关节的研究较少,难以对下肢各关节的运动进行全面了解;②大多数研究在探讨落地模式对侧切动作的影响时,仅选用单一的角度,缺乏进行多角度侧切时不同的落

地模式对下肢生物力学的影响;③现有的研究对侧切过程中减速、改变方向和加速阶段的下肢关节峰值力的研究还较少,难以探究不同的侧切落地模式和角度对下肢关节峰值力的影响;④目前对侧切角度和落地模式的研究只集中单一因素的研究,很少把两者结合起来进行探讨,两者的交互作用尚不明确。此次综述结合了国内外的文献,对落地模式和角度对侧切动作的生物力学的影响进行了全面总结,一定程度上为侧切动作的执行与防护提供了参考依据和理论基础,但是未来仍需大量的研究探究两者之间的关系,进一步为预防膝关节前交叉韧带损伤提供理论依据。

综述对侧切落地模式和角度的生物力学影响进行了全面总结,填补了既往研究对该主题研究讨论的不足,可为侧切动作中膝关节损伤的预防提供一定的理论支持和参考依据。但是针对侧切落地模式和侧切的角度,未来还需要借助现代生物力学研究方法,进一步了解落地模式和角度在侧切动作中对人体生物力学的影响,以及二者之间的联系,进而探讨侧切动作引起损伤的可能原因,从而为运动者提供更为具体、合理的建议。

作者贡献: 第一作者负责综述的构思、资料的收集、撰写以及文章的修改,通讯作者负责论文的审核。

经费支持: 该文章接受了“国家自然科学基金(11572202)”的资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

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。

写作指南: 该研究遵守《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA指南)。

文章查重: 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。

文章外审: 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。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

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。

4 参考文献 References

- [1] FOX AS. Change-of-Direction Biomechanics: Is What's Best for Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Also Best for Performance? Sports Med (Auckland, N.Z.). 2018;48(8):1799-1807.
- [2] DAVID S, MUNDT M, KOMNIK I, et al. Understanding cutting maneuvers- The mechanical consequence of preparatory strategies and foot strike pattern. Hum Movement Sci. 2018;62:202-210.
- [3] KIM JH, LEE KK, KONG SJ, et al. Effect of anticipation on lower extremity biomechanics during side- and cross-cutting maneuvers in young soccer players. Am J Sports Med. 2014;42(8):1985-1992.
- [4] HAVENS KL, SIGWARD SM. Whole body mechanics differ among running and cutting maneuvers in skilled athletes. Gait Posture. 2015;42(3):240-245.
- [5] GLAISTER BC, ORENDURFF MS, SCHOEN JA, et al. Ground reaction forces and impulses during a transient turning maneuver. J Biomech. 2008;41(14):3090-3093.
- [6] CONDELLO G, KERNOSZEK TW, TESSITORE A, et al. Biomechanical Analysis of a Change-of-Direction Task in Collegiate Soccer Players. Int J Sports Physiol Perform. 2016;11(1):96-101.
- [7] HAVENS KL, SIGWARD SM. Cutting mechanics: relation to performance and anterior cruciate ligament injury risk. Med Sci Sports Exerc. 2015;47(4):818-824.
- [8] ORENDURFF MS, SEGAL AD, BERGE JS, et al. The kinematics and kinetics of turning: limb asymmetries associated with walking a circular path. Gait Posture. 2006;23(1):106-111.
- [9] KENJI K, SHINJI S. A sidestep cut preparation strategy decreases the external load applied to the knee joint. Int J Sport Health Sci. 2013;11:109-117.

- [10] LUCAS LA, ENGLAND BS, MASON TW, et al. Decision making influences tibial impact accelerations during lateral cutting. *J Appl Biomech.* 2018;34(5):414-418.
- [11] DAVID S, KOMNIK I, PETERS M, et al. Identification and risk estimation of movement strategies during cutting maneuvers. *J Sci Med Sport.* 2017; 20(12):1075-1080.
- [12] CORTES N, MORRISON S, LUNEN BLV, et al. Landing technique affects knee loading and position during athletic tasks. *J Sci Med Sport.* 2012;15(2):175-181.
- [13] DONNELLY CJ, CHINNASEE C, WEIR G, et al. Joint dynamics of rear- and fore-foot unplanned sidestepping. *J Sci Med Sport.* 2017;20(1):32-37.
- [14] YOSHIDA N, KUNUGI S, MASHIMO S, et al. Effect of forefoot strike on lower extremity muscle activity and knee joint angle during cutting in female team handball players. *Sports Med Open.* 2015;2:32.
- [15] OGASAWARA I, SHIMOKOCHI Y, MAE T, et al. Rearfoot strikes more frequently apply combined knee valgus and tibial internal rotation moments than forefoot strikes in females during the early phase of cutting maneuvers. *Gait Posture.* 2020;76:364-371.
- [16] 林宇峰, 李海伟, 赵铠泽. 不同着地技巧对膝关节负荷及其位置影响研究 [J]. *成都体育学院学报*, 2014,40(1):74-78.
- [17] HAVENS KL, SIGWARD SM. Joint and segmental mechanics differ between cutting maneuvers in skilled athletes. *Gait Posture.* 2015;41(1):33-38.
- [18] SCHREURS MJ, BENJAMINSE A, LEMMINK KAPM. Sharper angle, higher risk? The effect of cutting angle on knee mechanics in invasion sport athletes. *J Biomech.* 2017;63:144-150.
- [19] SIGWARD SM, CESAR GM, HAVENS KL. Predictors of frontal plane knee moments during side-step cutting to 45 and 110 degrees in men and women: implications for anterior cruciate ligament injury. *Clin J Sport Med.* 2015;25(6):529-534.
- [20] CORTES N, ONATE J, LUNEN BLV. Pivot task increases knee frontal plane loading compared with sidestep and drop-jump. *J Sports Sci.* 2011;29(1):83-92.
- [21] SCHOT P, DART J, SCHUH M. Biomechanical analysis of two change-of-direction maneuvers while running. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1995;22(6): 254-258.
- [22] MIZUNO K, ANDRISH JT, BOGERT AJVD, et al. Gender dimorphic ACL strain in response to combined dynamic 3D knee joint loading: implications for ACL injury risk. *Knee.* 2009;16(6):432-440.
- [23] BODEN BP, TORG JS, KNOWLES SB, et al. Video analysis of anterior cruciate ligament injury: abnormalities in hip and ankle kinematics. *Am J Sports Med.* 2009;37(2):252-259.
- [24] OLSEN OE, MYKLEBUST G, ENGBRETSSEN L, et al. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med.* 2004;32(4):1002-1012
- [25] KRISTIANSLUND E, FAUL O, BAHR R, et al. Sidestep cutting technique and knee abduction loading: implications for ACL prevention exercises. *Br J Sports Med.* 2014;48(9):779-783.
- [26] HADER K, ALBERTO MV, PALAZZI D, et al. Metabolic power requirement of change of direction speed in young soccer players: not all is what it seems. *PLoS One.* 2016;11(3):e0149839.
- [27] SIGWARD SM, POWERS CM. Loading characteristics of females exhibiting excessive valgus moments during cutting. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2007;22(7):827-833.
- [28] JAMISON ST, PAN X, CHAUDHARI AM. Knee moments during run-to-cut maneuvers are associated with lateral trunk positioning. *J Biomech.* 2012; 45(11):1881-1885.
- [29] JONES PA, HERRINGTON LC, GRAHAM-SMITH P. Technique determinants of knee joint loads during cutting in female soccer players. *Hum Movement Sci.* 2015;42:203-211.
- [30] MARSHALL BM, FRANKLYN-MILLER AD, KING EA, et al. Biomechanical factors associated with time to complete a change of direction cutting maneuver. *J Strength Cond Res.* 2014;28(10):2845-2851.
- [31] SPITERI T, COCHRANE JL, HART NH, et al. Effect of strength on plant foot kinetics and kinematics during a change of direction task. *Eur J Sport Sci.* 2013;13(6):646-652.
- [32] DOS'SANTOS T, THOMAS C, COMFORT P, et al. The effect of angle and velocity on change of direction biomechanics: an angle-velocity trade-Off. *Sports Med.* 2018;48(10):2235-2253.
- [33] NISELL R. Mechanics of the knee. A study of joint and muscle load with clinical applications. *Acta Orthop Scand Suppl.* 1985;216:1-42.
- [34] HADER K, PALAZZI D, BUCHHEIR M. Change of direction speed in soccer: how much braking is enough? *Kineziologija.* 2015;47(1):67-74.
- [35] 时潇, 谢地. 侧切动作中前交叉韧带损伤机制研究进展 [J]. *中国运动医学杂志*, 2019,38(5):418-423.
- [36] KOVACS I, TIHANYI J, DEVITA P, et al. Foot placement modifies kinematics and kinetics during drop jumping. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31(5):708-716.
- [37] SELL TC, FERRIS CM, ABT JP, et al. Predictors of proximal tibia anterior shear force during a vertical stop-jump. *J Orthop Res.* 2007;25(12):1589-1597.
- [38] SANKEY SP, ROBINSON MA, VANRENTERGHEM J. Whole-body dynamic stability in side cutting: implications for markers of lower limb injury risk and change of direction performance. *J Biomech.* 2020;104:109711.
- [39] POLLARD CD, SIGWARD SM, POWERS CM. Gender differences in hip joint kinematics and kinetics during side-step cutting maneuver. *Clin J Sport Med.* 2007;17(1):38-42.
- [40] NEDERGAARD NJ, KERSTING U, LAKE M. Using accelerometry to quantify deceleration during a high-intensity soccer turning manoeuvre. *J Sports Sci.* 2014;32(20):1897-1905.
- [41] JONES PA, HERRINGTON L, GRAHAM-SMITH P. Braking characteristics during cutting and pivoting in female soccer players. *J Electromyogr Kinesiol.* 2016; 30:46-54.
- [42] JONES PA, HERRINGTON LC, GRAHAM-SMITH P. Technique determinants of knee abduction moments during pivoting in female soccer players. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2016;31:107-112.
- [43] SUZUKI Y, AE M, TAKENAKA S, et al. Comparison of support leg kinetics between side-step and cross-step cutting techniques. *Sports Biomech.* 2014;13(2):144-153.
- [44] JONES PA, THOMAS C, DOS'SANTOS T, et al. The role of eccentric strength in 180° turns in female soccer players. *Sports (Basel).* 2017;5(2):42.
- [45] DOS'SANTOS T, THOMAS C, JONES PA, et al. Mechanical determinants of faster change of direction speed performance in male athletes. *J Strength Cond Res.* 2017;31(3):696-705.
- [46] SHERBONDY PS, QUEALE WS, MCFARLAND EG, et al. Soleus and gastrocnemius muscle loading decreases anterior tibial translation in anterior cruciate ligament intact and deficient knees. *J Knee Surg.* 2003;16(3):152-158.
- [47] IMRAN A, O'CONNOR JJ. Theoretical estimates of cruciate ligament forces: effects of tibial Engineers. *Proc Inst Mech Eng H.* 1997;211(6):425-439.
- [48] ZEBIS MK, ANDERSEN LL, BENCKE J, et al. Identification of athletes at future risk of anterior cruciate ligament ruptures by neuromuscular screening. *Am J Sports Med.* 2009;37(10):1967-1973.
- [49] MACWILLIAMS BA, WILSON DR, DESJARDINS JD, et al. Hamstrings cocontraction reduces internal rotation, anterior translation, and anterior cruciate ligament load in weight-bearing flexion. *J Orthop Res.* 1999;17(6): 817-822.
- [50] 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. *Am J Sports Med.* 2005;33(4):492-501.
- [51] DEMORAT G, WEINHOLD P, BLACKBURN T, et al. Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2004;32(2):477-483.
- [52] WEINHANDL JT, EARL-BOEHM JE, EBERSOLE KT, et al. Reduced hamstring strength increases anterior cruciate ligament loading during anticipated sidestep cutting. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2014;29(7):752-759.
- [53] OSGNACH C, POSER S, BERNARDINI R, et al. Energy cost and metabolic power in elite soccer: a new match analysis approach. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42(1):170-178.
- [54] BESIER TF, LLOYD DG, ACKLAND TR. Muscle activation strategies at the knee during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(1): 119-127.
- [55] ANDREWS JR, MCLEOD WD, WARD T, et al. The cutting mechanism. *Am J Sports Med.* 1977;5(3):111-121.
- [56] RAND MK, OHTSUKI T. EMG analysis of lower limb muscles in humans during quick change in running directions. *Gait Posture.* 2000;12(2):169-183.
- [57] 周志鹏. 神经肌肉功能与前交叉韧带损伤生物力学危险因素的相关性研究 [D]. 北京: 北京体育大学, 2018.
- [58] MALINZAK RA, COLBY SM, KIRKENDALL DT, et al. A comparison of knee joint motion patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2001;16(5):438-445.
- [59] SHEPPARD JM, YOUNG WB. Agility literature review: classifications, training and testing. *J Sports Sci.* 2006;24(9):919-932.
- [60] SUCHOMEL TJ, NIMPHIUS S, STONE MH. The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Med.* 2016;46(10):1419-1449.
- [61] SPITERI T, NIMPHIUS S, HART NH, et al. Contribution of strength characteristics to change of direction and agility performance in female basketball athletes. *J Strength Cond Res.* 2014;28(9):2415-2423.
- [62] JAMISON ST, MCNALLY MP, SCHMITT LC, et al. The effects of core muscle activation on dynamic trunk position and knee abduction moments: implications for ACL injury. *J Biomech.* 2013;46(13):2236-2241.
- [63] BODEN BP, DEAN GS, FEAGIN JA, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 2000;23(6):573-578.
- [64] DONNELLY CJ, ELLIOTT BC, DOYLE TLA, et al. Changes in knee joint biomechanics following balance and technique training and a season of Australian football. *BJ Sports Med.* 2012;46(13):917-922.
- [65] DAOUD AI, GEISSLER GJ, WAND F, et al. Foot strike and injury rates in endurance runners: a retrospective study. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(7): 1325-1334.
- [66] CHEN Y, WANXIANGY, GARRETTWE, 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.

(责任编辑: WZH, ZN, DL)