

·运动人体科学·

前交叉韧带易伤动作的下肢运动生物力学分析

苏玉林^{1,2}, 李翰君², 于冰³, 刘卉²

(1.广西体育科学研究所, 广西 南宁 530031; 2.北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084;
3.美国北卡罗莱纳大学 人体运动科学中心, 北卡罗莱纳州(美国) 27514)

摘 要: 对31名(13男, 18女)普通大学生完成急停起跳、侧切和垂直落地前冲动作下肢运动学和动力学指标进行测试与分析, 以了解不同前交叉韧带危险动作和性别对下肢力学指标的影响。应用红外光点运动测试系统和测力台对受试者完成动作过程中膝关节三维角度和地面三维反作用力进行测量。研究表明, 3个动作着地阶段的力学指标有显著不同, 证明3种运动形式在前交叉韧带损伤机制上存在差异。与急停起跳和垂直落地前冲动作相比, 完成侧切动作将受到较高的水平方向地面反作用力, 产生较小的膝关节屈角和较大的膝关节外展角。3个动作着地阶段中的力学差异不受性别影响。

关 键 词: 运动生物力学; 易伤动作; 前交叉韧带

中图分类号: G804.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2009)08-0096-06

Biomechanical analysis of anterior cruciate ligament injury risky lower limb moves

SU Yu-lin^{1,2}, LI Han-jun², YU Bing³, LIU Hui²

(1.Guangxi Institute of Sports Science, Nanning 530031, China;

2.College of Human Movement Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China;

3.Human Movement Science Center, University of North Carolina at Chapel Hill, North Carolina 27514, USA)

Abstract: The authors tested and analyzed the kinetic and dynamic indexes of such lower limb moves as jumping after a sudden stop, sideward dashing and forward dashing after vertical landing on the ground completed by 31 (13 male and 18 female) college students, so as to comprehend the effects of different anterior cruciate ligament injury risky moves and genders on the mechanical indexes of lower limbs. By using an infrared point movement test system and a force measurement deck, the authors measured the 3D angles of the knee joints and the 3D reaction forces of the ground during the testees completing the moves, and revealed the following findings: at the landing stage, the mechanical indexes of these three moves are significantly different, which proves that there is a difference between these three movement forms in the anterior cruciate ligament injuring mechanism; compared with the moves of jumping after a sudden stop and forward dashing after vertical landing on the ground, completing the sideward dashing move will subject to a bigger horizontal ground reaction force, and produce a smaller knee joint flexion angle and a larger knee joint abduction angle; at the landing stage, the mechanical differences between these three moves are not affected by gender.

Key words: sports biomechanics; injury risky moves; anterior cruciate ligament

绝大多数前交叉韧带损伤是可以预防的^[1]。研究表明大多数前交叉韧带损伤是非接触性损伤, 也就是说损伤发生时运动员间并未发生身体接触^[2]。而且在运动

员的前交叉韧带损伤中由于个人技术失误而致伤的占首位^[3]。确定前交叉韧带损伤机制和危险因素是预防前交叉韧带损伤至关重要的第一步。只有确定了危险因

收稿日期: 2009-02-25

基金项目: 北京市重点实验室项目(2007TY019)。

作者简介: 苏玉林(1982-), 男, 硕士, 研究方向: 运动生物力学。通讯作者: 刘卉(1972-), 女, 副教授, 博士。

素,才有可能建立有效的预防手段预防损伤。

目前对前交叉韧带无接触损伤致伤因素的研究多是仅仅对某一个特定动作的研究。McClean 等^[4]的研究表明侧切动作时膝关节最大外展力矩与脚触地时较大的膝关节外展角度有关,而膝关节所受外展力矩又被证明是前交叉韧带断裂的因素之一;在完成侧切动作时,膝关节矢状面的生物力学因素可能并不是造成前交叉韧带损伤的主要因素^[5]。而对急停起跳动作的研究表明,着地时膝关节屈伸角与前交叉韧带负荷和损伤率有关^[6]。现有研究表明“急停起跳”、“侧切”和“垂直落地前冲”等动作都是前交叉韧带无接触损伤的高发动作^[7]。这些动作中影响前交叉韧带受力的生物力学因素很可能不同,因而致伤机制和因素也不同。但是目前文献中尚无对多个动作中前交叉韧带无接触损伤致伤因素的综合研究。

本研究的目的是对 3 种前交叉韧带易伤动作中的下肢运动进行运动学和动力学比较,验证两个研究假设:(1)急停起跳侧切和垂直落地前冲动作中着地阶段的力学指标有显著不同;(2)3 个动作着地阶段的力学差异不受性别影响。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

受试者均为北京体育大学普通大学生,其中男 13 人,年龄(19.5 ± 1.2)岁,身高(178.8 ± 6.7) cm,体重(72.6 ± 13.0) kg;女 18 人,年龄(18.8 ± 0.9)岁,身高(166.1 ± 5.7) cm,体重(55.1 ± 6.3) kg。所有受试者身体状况良好,未接受过专业体育训练,且均无下肢受伤史。

1.2 测试方法

本研究的测试动作为急停起跳、侧切和垂直落地前冲 3 种前交叉韧带损伤高发动作。急停起跳要求受试者在离测力台 4 m 处开始进行全力的助跑,两足同时落在测力台台面上做急停,然后立刻尽全力垂直向上跳起,最后落地结束动作。急速变向侧切动作要求受试者在离测力台 4 m 处开始进行全力的助跑,在右侧测力台台面上着地,然后向助跑方向左侧 45° 急速变向,并继续全速奔跑 4 步后缓冲停止,结束动作。落地前冲动作要求受试者在离测力台 4 m 处开始进行全力的助跑,两足同时落在测力台台面上做急停,然后立刻尽全力垂直向上跳起,双足同时分别在两个测力台台面上落下后立刻尽全力进行快速前冲,冲刺 4 步后缓冲停止,结束动作。每个受试者每一个动作采集 3 次有效数据。

进行动作测试之前,每个受试者身上设置了 9 个动作测试反光点分别是:髌后上棘中点(第 4、5 腰椎

之间)、左和右髌前上棘(髌前上棘)、左和右外膝(腓骨头)、左和右胫骨粗隆(胫骨粗隆)、左和右外踝(腓骨外踝点),完成所有测试动作之后又增设了 4 个参考测试反光点,分别是:左和右内膝(胫骨内侧髁)、左和右内踝(胫骨内踝点),进行静态测试。

运动学数据使用瑞典 6 摄像头 Qualisys-MCU500 红外运动测试系统进行采集,数据采集频率为 200 幅/s。动力学数据使用两台瑞士产 Kistler 测力台(9281CA),数据采集频率为 1 000 Hz/频道。运动学与动力学数据的采集由 Qualisys 数据采集系统进行同步触发。

1.3 数据处理

对 3 次有效数据中地面垂直反作用力最大的一次进行处理与分析。为使数据有可比性,只选择侧切支撑腿侧(右侧)测力台和膝关节角度数据进行计算。根据髌后上棘中点标志点和左右髌前上棘标志点的坐标计算髌关节转动中心坐标^[8]。

右髌关节转动中心坐标 $X = -0.096 \times L$;

右髌关节转动中心坐标 $Y = -0.31 \times PD$;

右髌关节转动中心坐标 $Z = 0.09 \times PW - 111$;

其中 L 为同侧髌前上棘到内踝的距离; PD 为骨盆厚度,为左右髌前上棘中点和左右髌后上棘中点的距离; PW 为骨盆宽度,为左右髌前上棘的距离。

动作过程中内侧膝关节和踝关节标志点的坐标根据静态测试中各标志点坐标计算^[9]。首先根据静态和动作测试时膝关节外侧点、踝关节外侧点和胫骨粗隆标志点建立小腿固联坐标系,并计算小腿坐标系与大地坐标系之间的方向余弦矩阵。根据静态测试时的方向余弦矩阵计算静态测试时膝关节内侧点和踝关节内侧点相对小腿固联坐标系的坐标。假设小腿为刚体,膝关节内侧点和踝关节内侧点在小腿上的相对位置在动作测试时保持不变。因此可以根据动作测试时每幅画面小腿坐标系与大地坐标系的方向余弦矩阵,以及膝关节内侧点和踝关节内侧点相对小腿坐标系的坐标,最终计算出膝关节内侧点和踝关节内侧点在大地坐标系下的坐标。

膝(踝)关节中心为膝(踝)内侧点和膝(踝)外侧点的中点。根据测试和计算的标志点坐标建立大腿坐标系和小腿坐标系。

在大腿坐标系中,

$$i = \frac{r_{\text{右膝-右髌}}}{|r_{\text{右膝-右髌}}|}; \quad K = \frac{r_{\text{右髌-左髌}}}{|r_{\text{右髌-左髌}}|}; \quad j = k \times i$$

其中 $r_{\text{右膝-右髌}}$ 为从右膝关节中心指向右髌关节中心的矢量; $r_{\text{右髌-左髌}}$ 为从右髌关节中心指向左髌关节中心的矢量。

在小腿坐标系中,

$$i = \frac{r_{\text{右踝-右膝}}}{|r_{\text{右踝-右膝}}|}; K = \frac{r_{\text{膝外-膝内}}}{|r_{\text{膝外-膝内}}|}; j = k \times i$$

其中 $r_{\text{右踝-右膝}}$ 为从右踝关节中心指向右膝关节中心的矢量, $r_{\text{膝外-膝内}}$ 为从右膝关节外侧标志点指向右膝关节内侧标志点的矢量。

膝关节角度定义为大腿坐标系和小腿坐标系之间的欧拉角,第 1 次转动围绕 Z 轴,获得屈伸角(膝关节伸直时为 0° 屈,正角为屈状态),第 2 次转动围绕 Y 轴,获得内收外展角(正角为内收,负角为外展),第 3 次转动围绕 X 轴,获得旋内、旋外角。

以往研究表明,地面反作用力的大小与前交叉韧带受力有关^[6],而且 Cerulli^[9]的研究结果显示,前交叉韧带张力最大值时刻出现在脚接触地面后不久的地面反作用力最大值时刻。因此,本研究动力学指标是完成动作过程中不同阶段地面反作用力在 3 个方向上首次出现的最大值,进行标准化,单位为 BW(以相当于被试者体重计算)。运动学指标为垂直方向力首次出现最大值时膝关节屈伸和内收外展角(单位为°)。采用重复测量双因素方差分析(性别×动作)方法确定动作和性别对力学指标的影响。所有统计过程应用 SPSS 16.0 软件完成。

3 结果及分析

测试指标的双因素方差分析结果表明,男女受试

者在各指标上差异均不显著,而不同动作是造成多数指标之间差异的重要原因。另外,一些指标还表现出受到不同性别和动作之间的交互作用(表 1)。

表 1 测试指标双因素方差分析结果(P 值)

测试指标	动作因素	性别因素	交互作用
垂直方向力	0.301	0.416	0.327
左右方向力	0.000 ²⁾	0.351	0.038 ¹⁾
前后方向力	0.011 ¹⁾	0.775	0.066
膝屈伸角	0.000 ²⁾	0.120	0.610
膝内收外展角	0.000 ²⁾	0.734	0.047 ¹⁾

1)0.01<P<0.05; 2)P<0.01

由于性别和动作因素对力学指标有交互影响,为了进一步说明受试者完成不同动作时力学指标之间的差异,将男女受试者指标分别进行单因素方差分析,并进一步应用 LSD 法对不同情况进行配对检验(表 2~5)。研究结果显示,不同动作对男女左右方向力、前后方向力和着地时膝关节屈角及外展角的大小产生了显著影响。侧切动作产生了最大的左右方向地面反作用力,且与其他两个动作之间的差异具有非常显著意义。落地前冲动作落地时受到了向前的地面反作用力,与急停起跳和侧切动作落地受到的向后的地面反作用力相比,差异具有显著意义。在 3 种动作中,男女受试者在落地前冲动作着地时具有最大的膝关节屈角和最小的内收角,且与其他两个动作具有显著差异。

表 2 男受试者 3 个动作力学指标 ($\bar{x} \pm s$) 测试结果

动作	n/人	垂直方向力/BW	左右方向力/BW	前后方向力/BW	膝屈伸角 / (°)	膝内收外展角 / (°)
急停起跳	13	2.31±0.90	0.14±0.14	0.36±0.20	30.01±9.93	21.92±6.61
侧切	13	2.01±0.35	0.42±0.09	0.44±0.14	27.43±7.34	16.32±3.81
落地前冲	13	1.99±0.68	0.22±0.11	-0.60±0.37	46.831±2.44	5.62±4.51

表 3 男受试者 3 个动作力学指标差异性检验结果

测试指标	n/人	方差分析	急停起跳与侧切	急停起跳与落地前冲	侧切与落地前冲
垂直方向力	13	0.741	0.353	0.905	0.516
左右方向力	13	0.000 ²⁾	0.000 ²⁾	0.076	0.000 ²⁾
前后方向力	13	0.016 ¹⁾	0.435	0.021 ¹⁾	0.012 ¹⁾
膝屈伸角	13	0.000 ²⁾	0.339	0.017 ¹⁾	0.001 ²⁾
膝内收外展角	13	0.000 ²⁾	0.007 ²⁾	0.000 ²⁾	0.001 ²⁾

1)0.01<P<0.05; 2)P<0.01

表4 女受试者3个动作力学指标 ($\bar{x} \pm s$) 测试结果

动作	n/人	垂直方向力 /BW	左右方向力 /BW	前后方向力 /BW	膝屈伸角 / (°)	膝内收外展角 / (°)
急停起跳	18	2.56±0.81	0.16±0.06	0.37±0.15	37.31±9.72	17.92±9.21
侧切	18	2.30±0.68	0.44±0.16	0.47±0.20	28.44±16.34	20.42±11.31
落地前冲	18	1.94±0.95	0.20±0.14	-0.59±0.32	49.33±14.91	9.24±8.24

表5 女受试者3个动作力学指标差异性检验结果

测试指标	n/人	方差分析	急停起跳与侧切	急停起跳与落地前冲	侧切与落地前冲
垂直方向力	18	0.064	0.199	0.015 ¹⁾	0.205
左右方向力	18	0.000 ²⁾	0.000 ²⁾	0.326	0.000 ²⁾
前后方向力	18	0.015 ¹⁾	0.286	0.013 ¹⁾	0.024 ¹⁾
膝屈伸角	18	0.000 ²⁾	0.059	0.000 ²⁾	0.001 ²⁾
膝内收外展角	18	0.002 ²⁾	0.327	0.002 ²⁾	0.001 ²⁾

1)0.01<P<0.05; 2)P<0.01

虽然双因素方差分析结果表明性别并不是影响完成不同测试动作时所受地面反作用力和膝关节角度的重要因素,但对各动作指标进行男女差异检验还是可以发现,急停起跳着地最大地面垂直反作用力(男 (2.31 ± 0.90) BW、女 (2.56 ± 0.81) BW),以及此时的膝关节屈角(男 $(30.01 \pm 9.94)^\circ$ 、女 $(37.32 \pm 9.73)^\circ$)均表现出男女受试者之间差异的显著性($P<0.05$),而侧切动作和落地前冲动作的各项指标在男女之间的差异上均没有表现出统计学意义。

4 讨论

本研究所得测试结果支持研究假设,即急停起跳、侧切和垂直落地前冲动作中着地阶段中的力学指标有显著不同;3个动作着地阶段中的力学差异不受性别影响。

4.1 动作对各指标的影响

1)动作对地面反作用力的影响。

地面反作用力是前交叉韧带损伤的重要机制^[10]。本研究急停起跳动作男女受试者着地时的地面最大垂直反作用力大小与 Yu^[6]的结果(男 (2.16 ± 0.6) BW、女 (2.67 ± 0.95) BW)相近,而向后反作用力最大值小于其研究数据(男 (0.95 ± 0.34) BW、女 (1.16 ± 0.55) BW)。本研究中侧切动作地面反作用力数值大于 McLean^[11]的研究结果(男 (1.12 ± 0.11) BW、女 (1.12 ± 0.26) BW)。本研究中着地时刻最大地面垂直反作用力的大小男女受试者均表现为急停起跳>侧切>落地前冲的顺序,但差异并没有统计学意义。由于动作形式不同,侧切动作着地时脚的动作方向和用力意识使得受到的垂直反作用力较小。

虽然多数实验研究认为仅膝关节的外展力矩似乎不可能是前交叉韧带无接触性损伤的主要因素,但来自 Hewett^[12]的流行病学研究报告表明,在垂直跳跃运动中,处于外展状态的膝关节所受的外展力矩容易造成前交叉韧带损伤。而向外(对右腿来说向右)的地面反作用力正是产生膝关节外展力矩的重要原因之一。另外,水平向后的地面反作用力越大,膝关节伸膝力矩就越大,因此髌韧带对胫骨的作用力就越大。而且,地面向后水平反作用力对膝关节的力臂是髌韧带对膝关节力臂的10倍左右,这就意味着地面向后反作用力增加1倍,髌韧带力将随之增加10倍左右。因此,人体在急停起跳和侧切动作中所受到的水平向后的地面反作用力是在胫骨受到向前作用力的重要因素,而胫骨的前移意味着前交叉韧带负荷的增加。

本研究中侧切动作产生的向右方向水平力最大,由此造成的膝关节外展力矩也最大。同时侧切动作产生的向后方向水平力最大,由此造成的胫骨向前作用力最大。结合方差分析结果可以认为,侧切动作所产生的较高的水平方向地面反作用力是造成完成这一动作时前交叉韧带损伤的原因之一。

2)动作对膝关节角度的影响。

综合研究文献结果可以看出,在进行跳跃运动时,较小的膝关节弯屈角度可能是无接触前交叉韧带致伤的重要因素^[13-15]。这是因为,膝关节屈角的减小可以增加前交叉韧带倾斜角(elevation angle)和偏向角(deviation angle),因而使前交叉韧带负荷增加^[13]。另外,在膝关节屈角小于 30° 时,股四头肌收缩使前交叉韧带所受的负荷值保持在一个较高的水平^[14]。而对侧切动作的研究结果表明,较大的膝关节外展角与膝关节

所受较大的外展力矩有关,而膝关节外展力矩的增加将造成前交叉韧带负荷的增加^[4]。

本研究中急停起跳着地时地面反作用力最大时刻的膝关节屈角与 Yu^[6]的研究结果相近(男 $(23.95 \pm 8.31)^\circ$ 、女 $(31.92 \pm 10.3)^\circ$)。本研究侧切动作着地时地面反作用力最大时刻的膝关节屈角小于 Mclean^[11]的研究结果(男 $(63.1 \pm 9.5)^\circ$ 、女 $(57.2 \pm 7.7)^\circ$),而膝关节外展角大于其研究结果(男 $(12.1 \pm 4.5)^\circ$ 、女 $(14.2 \pm 5.2)^\circ$)。造成本研究和以往研究结果差异的原因可能在于受试者技术水平不同。本研究受试者为没有受过体育专项训练的普通大学生,而以往的研究受试者多为专业运动员或定期参加体育锻炼的业余运动员。Sigward^[16]的研究表明有无训练经验并不影响完成侧切动作时的膝关节运动,但无训练经验的受试者还是会采取一定的动作保护机制来完成自己不熟悉的动作。另外一个造成本研究与以往研究膝关节角度差异的原因可能在于计算膝关节角度的方法不同以及下肢标志点固定位置的不同。

本研究方差分析结果表明,关节角度指标在运动形式之间的差异具有显著的意义。3种动作中,落地前冲具有最大的膝关节屈角和最小的外展角。而侧切动作具有最小的膝关节屈角和较大(女性为最大)的外展角。造成这种结果的原因应该与动作本身的目的要求有关。结合以往研究结论可以认为,完成侧切动作时,较小的膝关节屈角和较大的膝关节外展角是该动作致使前交叉韧带损伤的重要原因之一。

另外,方差分析结果还表明性别和动作这两个因素对着地时膝关节外展角具交互影响。男性受试者急停起跳着地时膝关节外展角最大,侧切次之,而女性受试者侧切着地时外展角大于急停起跳。这些结果可能意味着前交叉韧带在同一动作中的损伤机制因性别而异。

4.2 性别对各指标的影响

1)性别对地面反作用力的影响。

本研究的数据表明,女受试者在急停起跳和侧切动作的落地阶段,以及3个动作的蹬伸阶段,都具有比男受试者要大的垂直地面反作用力。特别是急停起跳着地时的地面垂直反作用力女子要显著大于男子。这一结果与文献研究结果一致。Chappell^[17]研究了大学年龄业余运动员在急停起跳运动时的动力学和运动学指标。他们的结果显示,相对于男业余运动员,女业余运动员在急停起跳落地时其胫骨所受的剪切力峰值要大。Yu^[6]的研究结果则显示,在急停起跳着地瞬间,大学年龄的女运动员受到的地面反作用力峰值比男运动员的相应峰值大。但本研究受试者在侧切和落地前

冲着地的地面垂直反作用力没有表现出男女之间差异的显著性。这可能是因为,侧切动作的目的是通过支撑脚的侧向蹬伸获得水平方向力,从而使人体产生变向运动,因此足部着地后的动作特点决定所受垂直力相对较小,男女之间并无差异。另外,由于落地前冲的落地阶段所受地面垂直力与腾空高度有关,本文虽没有分析受试者腾空高度之间的差异,但男子应该比女子具有获得更高腾空高度的能力,而腾空越高,落地时速度越快,获得地面垂直反作用力也就越大。

从本研究结果可以看出,急停起跳动作中,着地瞬间较大的地面垂直反作用力可能是造成本研究女性测试群体前交叉韧带损伤的因素之一,但在完成另外两动作时,女性并没有受到比男性更大的地面垂直反作用力。本研究中男女受试者在任何情况下所受水平地面反作用力峰值的差异均没有显著意义,表明地面水平方向反作用力峰值可能不是造成本研究测试群体前交叉韧带损伤率性别差异的原因。

2)性别对膝关节角度的影响。

Malinzak 等^[18]发现与男性相比,在完成特定动作时,女性运动员趋向于较小的膝关节屈角、较大的膝外展角、较大的股四头肌活动,和较低的腘绳肌活动。而本研究结果表明,在急停起跳落地时,女性受试者的膝关节屈角要显著大于男性受试者。综合3个动作的分析结果表明,性别对着地时膝关节屈角并无显著影响。造成本研究与以往研究结果不一致的原因依然可能与受试者的运动水平不同有关。没有经过运动训练的普通大学生的运动能力可能比某专项运动员具有更大的个体差异,这可能也是造成本研究测试数据没有明显表现出男女差异的原因之一。本研究结果提醒我们,未参加体育专项训练的普通人群的前交叉韧带损伤机制与因素可能与专业运动员不同。

4.3 对今后研究的建议

由于本实验的受试者均为普通大学生,且均无任何运动训练史,虽然在完成测试动作过程中主观上均非常努力认真,但不可能像专业运动员一样达到快速有力的运动效果,另外对完成陌生动作时人体所产生的保护性动作控制都可能是造成本研究测试数据与以往以专业运动员为研究对象的研究结果有一定的差距。因此本研究的结果与结论更适用于本研究测试人群,而对专业运动员适用性有限。今后研究可以再选用一些经过良好训练的专业运动员作为实验受试者,与无训练经验受试者的数据进行对比,研究不同训练水平和身体素质的受试者在完成不同动作时力学特点,了解训练水平和身体素质对前交叉韧带损伤的因素的影响。

急停起跳、侧切和垂直落地前冲动作中着地阶段中的力学指标有显著不同, 证明 3 种运动形式在前交叉韧带损伤机制上存在差异。与急停起跳和垂直落地前冲动作相比, 完成侧切动作受到较高的水平方向地面反作用力, 产生较小的膝关节屈角和较大的膝关节外展角。侧切动作可能是本研究测试群体前交叉韧带损伤的高发动作。

3 个动作着地阶段中的力学差异不受性别影响。本研究测试群体并没明显表现出女性前交叉韧带损伤可能性高于男性的趋势。

参考文献:

- [1] Griffin L Y, Agel J, Albohm M J, et al. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: risk factors and prevention strategies[J]. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 2000, 8(3): 141-50.
- [2] Boden B P. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury[J]. *Orthopedics*, 2000, 23(6): 573-538.
- [3] 王健, 教英芳. 青少年前交叉韧带损伤流行病学研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2002, 21(5): 471-474, 483.
- [4] McLean S G, Huang X, van den Bogert A J. Association between lower extremity posture at contact and peak knee valgus moment during sidestepping: Implications for ACL injury[J]. *Clinical Biomechanics*, 2005, 20: 863-870.
- [5] McLean S G, Huang X Su, van den Bogert A J. Sagittal plane biomechanics cannot injure the ACL during sidestep cutting[J]. *Clinical Biomechanics*, 2004, 19: 828-838.
- [6] Yu B, Lin C F, Garrett W E. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task [J]. *Clinical Biomechanics*, 2006, 21: 297-305.
- [7] Cochrane J L, Lloyd D G, Buttfield A, et al. Characteristics of anterior cruciate ligament injuries in Australian football [J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2007, 10: 96-104.
- [8] Bell A L, Pedersen D R, Brand R A. A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods[J]. *Journal of Biomechanics*, 1990, 23: 617-621.
- [9] Cerulli G, Benoit D L, Lamontagne, et al. In vivo anterior cruciate ligament strain behavior during a rapid deceleration movement: case report[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 2003, 11: 307-311.
- [10] DeMorat G, Weinhold P, Blackburn T, et al. Aggressive quadriceps loading can induce non-contact anterior cruciate ligament injury[J]. *American Journal of Sports Medicine*, 2004, 32: 477-483.
- [11] McLean S G, Lipfert S W, van den Bogert A J. Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2004, 36: 1008-1016.
- [12] Hewett T E, Myer G D, Ford K R, 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]. *American Journal of Sports Medicine*, 2005, 33: 492-501.
- [13] Arms S W, Pope M H, Johnson R J, et al. The biomechanics of anterior cruciate ligament rehabilitation and reconstruction [J]. *American Journal of Sports Medicine*, 1984, 12: 8-18.
- [14] Beynon B D, Fleming B C, Johnson R J, et al. Anterior cruciate ligament strain behavior during rehabilitation exercises in vivo[J]. *American Journal of Sports Medicine*, 1995, 23: 24-34.
- [15] Li G, Zayontz S, Most E, et al. In situ forces of the anterior and posterior cruciate ligaments in high knee flexion: an in vitro investigation [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2004, 22: 293-297.
- [16] Sigward S, Powers C M. The influence of experience on knee mechanics during side-step cutting in females[J]. *Clinical Biomechanics*, 2006, 21: 740-747.
- [17] Chappell J D, Yu B, Kirkendall D T, et al. A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks [J]. *American Journal of Sports Medicine*, 2002, 30: 261-267.
- [18] Malinzak R A, Colby S M, Kirkendall D T, et al. A comparison of knee joint motions patterns between men and women in selected athletic maneuvers[J]. *Clinical Biomechanics*, 2001, 16: 438-445.

[编辑: 郑植友]