

非接触性前交叉韧带损伤的生物力学风险评估及预防

郑荣强¹, 周静怡² (¹山东省体育科学研究中心, 山东省济南市 250102; ²济南市第五人民医院, 山东省济南市 250022)

文章亮点:

- 1 此问题的已知信息: 非接触性前交叉韧带损伤的风险因素有很多, 如解剖、内分泌、生物力学、神经肌肉控制、场地、运动防护等方面, 国外从各个方面进行了大量的研究。
- 2 文章增加的新信息: 文章主要从生物力学和神经肌肉控制这两个方面对非接触性前交叉韧带损伤的风险因素进行综述。从不同的生物力学研究手段对非接触性前交叉韧带损伤的机制进行了综合分析, 如损伤现场视频分析, 尸体和活体的生物力学研究, 及危险动作的运动学分析等, 并对损伤的性别差异进行了分析。
- 3 临床应用的意义: 对非接触性前交叉韧带损伤的各种预防方法进行了文献分析, 对降低非接触性前交叉韧带损伤的发生率有一定意义。

关键词:

组织构建; 组织工程; 运动医学; 非接触性; 前交叉韧带损伤; 生物力学; 风险评估; 性别差异; 本体感觉; 体能训练; 损伤预防

主题词:

前交叉韧带; 膝关节; 运动医学; 风险调节

基金资助:

国家体育总局重点研究领域课题(2012B050)

郑荣强, 男, 1973年生, 山东省济南市人, 汉族, 2009年上海体育学院毕业, 博士, 助理研究员, 主要从事运动医学及运动康复方面的研究。

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2014.24.024
[http://www.crter.org]

中图分类号:R318
文献标识码:A
文章编号:2095-4344
(2014)24-03919-06
稿件接受: 2014-05-19

摘要

背景: 非接触性前交叉韧带损伤占前交叉韧带损伤的80%, 且多发生于青春期女性, 如何对损伤的风险因素进行评估, 用于高危人群的筛选, 对有效预防损伤至关重要。

目的: 对非接触性前交叉韧带损伤的生物力学风险因素和预防手段进行阐述, 为非接触性前交叉韧带损伤的预防开辟新的思路。

方法: 应用计算机在互联网检索 PubMed 数据库和 CNKI 数据库 1979 至 2014 年相关文献, 在英文标题和摘要中以“on-contact anterior cruciate ligament, biomechanics, risk factors”和“non-contact anterior cruciate ligament, prevention”等关键词搜索, 中文文献以“前交叉韧带损伤, 生物力学”为关键词, 选择内容与非接触性前交叉韧带损伤生物力学分析和预防有关的文献。共纳入文献 58 篇。

结果与结论: 应用生物力学评估的手段对参加运动项目的青少年人群进行筛查, 对落地、急停、切步等高危动作中膝关节的运动学进行分析, 发现非接触性前交叉韧带损伤的高风险人群。尽早预防性训练计划的干预可以提高运动表现、纵跳高度及膝关节动态负荷状态下的稳定性, 发展平衡和提高腘绳肌的力量及核心控制能力, 可以最大限度预防非接触性前交叉韧带损伤的发生。

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.

Biomechanical risk factors and prevention of non-contact anterior cruciate ligament injury

Zheng Rong-qiang¹, Zhou Jing-yi² (¹Sports Science Research Center of Shandong Province, Jinan 250102, Shandong Province, China; ²The Fifth People's Hospital of Jinan, Jinan 250022, Shandong Province, China)

Abstract

BACKGROUND: Non-contact anterior cruciate ligament injury accounts for about 80% of all anterior cruciate ligament injuries, and mostly occurs in adolescent females. How to assess risk factors of the injury and screen in high-risk populations is essential for effective injury prevention.

OBJECTIVE: To summarize the relevant studies about the biomechanical risk factors and preventions methods of non-contact anterior cruciate ligament injury, and open up new ideas for the prevention of non-contact anterior cruciate ligament injury.

METHODS: The PubMed database and CNKI database were retrieved for articles published from 1979 to 2014 by network. The English key words were “non-contact anterior cruciate ligament, biomechanics, risk factors” and “non-contact anterior cruciate ligament, prevention”, while the Chinese key word was “anterior cruciate ligament injury, biomechanics”. The key words were put in the titles and abstracts to search the articles. A total of 58 articles were included which related to biomechanics research and prevention of anterior cruciate ligament injury.

RESULTS AND CONCLUSION: Biomechanical risk factors can be evaluated among adolescents who participate

Zheng Rong-qiang, Assistant professor, Ph.D., Sports Science Research Center of Shandong Province, Jinan 250102, Shandong Province, China

Accepted: 2014-05-19

in sports. Landing quickly, stopping, step cutting and other high-risk actions were screened and analyzed. High-risk crowd of non-contact anterior cruciate ligament injury can be found, and then targeted training. Prophylactic training can improve exercise performance, jumping height and the stability of knee joint in dynamic loading conditions, develop the balance, and increase hamstring muscle strength and controlling ability, which can maximize the prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries.

Subject headings: anterior cruciate ligament; knee joint; sports medicine; risk adjustment

Funding: Key Research Project of General Administration of Sport of China, No. 2012B050

Zheng RQ, Zhou JY. Biomechanical risk factors and prevention of non-contact anterior cruciate ligament injury. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2014;18(24):3919-3924.

0 引言 Introduction

前交叉韧带可防止胫骨向前移位,是膝关节重要的静力性稳定结构。前交叉韧带损伤是膝关节的常见损伤,是一种损毁性的创伤,将导致运动员短期的功能丧失,预后有可能发展成膝关节骨性关节炎^[1]。据保守估计在过去20年中美国施行前交叉韧带重建的患者达150万人次,每个患者进行前交叉韧带重建和康复的保守估计是17 000美元,每年整个美国的花费将达到30亿美元^[2-4]。前交叉韧带重建术的目的是为了防止半月板进一步损伤、恢复膝关节稳定性、预防膝关节进一步的退变,但研究表明10%-90%的前交叉韧带损伤的患者无论手术与否10-20年后都将出现骨性关节炎的症状^[5-8]。

非接触性前交叉韧带损伤是指在无外力作用的情况下,由于自身动作导致前交叉韧带应力异常而造成的损伤。大约80%前交叉韧带损伤是非接触性事件造成的^[9]。流行病学研究显示女性运动员相对男性运动员发生前交叉韧带损伤的概率高2-8倍^[10-13]。青春期前交叉韧带损伤没有性别差异,并且发生的概率很小^[14-15]。在青春期(14-19岁)男女性别在解剖、内分泌和神经肌肉控制方面存在很多差异,这可能是导致损伤发生性别差异的因素^[16-17]。在诸多因素中,解剖、内分泌、关节松弛度和遗传因素是人体固有存在的,而生物力学因素和神经肌肉控制是可以通过干预而发生改变,因此文章着重对非接触性前交叉韧带损伤的生物力学因素、神经肌肉控制因素和损伤的预防进行文献综述。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源 作者于2014年3月应用计算机互联网检索 PubMed 数据库 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>),在英文标题和摘要中以关键词“non-contact anterior cruciate ligament, biomechanics, risk factors”和“non-contact on-contact anterior cruciate ligament, prevention”等关键词搜索,中文文献以“前交叉韧带损伤,生物力学”为关键词,检索时限为1979年1月至2014年5月。

1.2 入选标准

纳入标准: 选择内容与非接触性前交叉韧带损伤风险因素、生物力学分析和预防有关的文献。

排除标准: 非接触性前交叉韧带损伤的解剖、内分泌等风险因素分析的文献。

1.3 检索结果及评价 计算机初检索到643篇文章,排除与本文研究目的无关的文献331篇,内容重复的影响因子较小的文献254篇,共有58篇文章符合标准。所选文献具有较强相关性和权威性,能体现出非接触性前交叉韧带损伤生物力学风险评估和预防研究的最新进展。

2 结果 Results

2.1 非接触性前交叉韧带损伤生物力学风险评估

2.1.1 视频分析 视频分析非常重要因为它可以从实际事件中获得运动学信息。有6例报道研究,损伤大多发生在膝关节落地或侧切的情况下,膝关节多处于伸直状态,并且所有的研究都发现了膝关节外翻的情况^[18](**图1**)。

Boden等^[19]发现在发生断裂的时刻,膝关节内旋和外旋的角度非常小,这与Olsen等的研究一致,他们认为90%的病例膝关节内、外旋的角度小于10°。Olsen等^[20]认为,外翻负荷结合膝关节旋转是损伤发生的原因,并认为髌间突碰撞是导致前交叉韧带负荷过大的原因之一。Boden和Teitz等^[21]认为明显的股四头肌的离心收缩是损伤发生的主要原因。但是由于视频分析研究缺乏统一的标准很难对他们之间进行比较,上述研究除了一例之外其它都是研究通过视觉观察。Krosshaug等^[22]确认视觉观察方法的准确性和精度都不高。

2.1.2 尸体和活体研究 最近的研究显示,影响前交叉韧带应力的主要因素是相对于胫骨的向前的剪切力,可来源于由后向前的外力作用,在伸膝过程中过强的股四头肌的收缩亦可产生胫骨向前的剪切力。前交叉韧带的应力主要来自于膝关节冠状面和横状面,生物力学的分析数据可来自膝关节手术时的活体研究,应力感应器置于前交叉韧带上,也可通过膝关节尸体研究获得,研究显示导致前交叉韧带损伤的主要是由后向前的应力,同时伴有内翻、外翻或内旋、外旋运动。膝关节外翻时会导致前交叉韧带应力增加,在内侧副韧带损伤后尤其明显,内侧副韧带断裂多发生在前交叉韧带断裂之前^[23-25]。

膝关节接近伸直时,股四头肌的收缩产生的由前向后的应力作用在胫骨近端,使前交叉韧带的应力增加。前交叉韧带应力随着髌腱作用力的大小和膝关节屈曲的角度

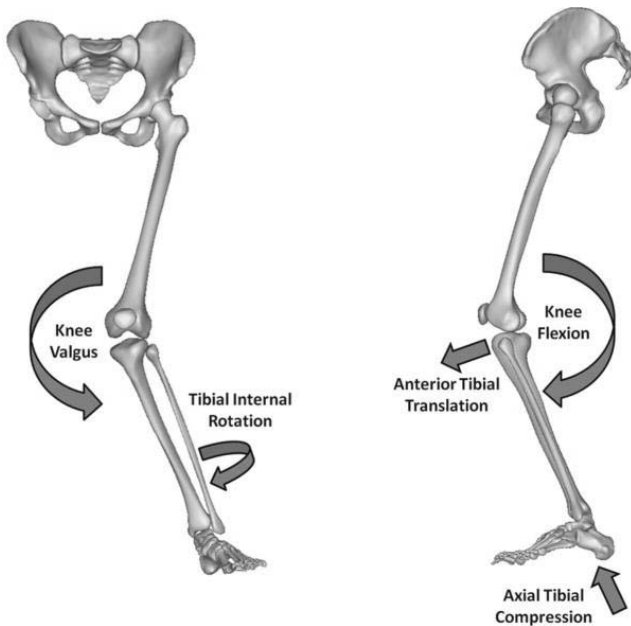


图1 多平面载荷非接触性前交叉韧带损伤的机制

变化而变化^[26]。膝关节接近伸直时, 髌腱牵拉胫骨向前的力量足以使前交叉韧带的应力增加。尸体研究显示膝关节屈曲25°时, 给予膝关节一个冲击力, 前交叉韧带的应力增加, 但在膝关节屈曲15°时, 膝关节屈曲平面会产生一个外翻应力, 前交叉韧带的应力会迅速增加^[27]。

体内试验产生相似的结论, 在关节镜手术时, 前交叉韧带完好, 拉力感应器放置于前交叉韧带上。测量仪放置足够长的时间来记录膝关节在不同情况下运动时前交叉韧带应力变化^[28]。研究发现前交叉韧带的应力随胫骨相对于股骨的由前向后的应力的变化而变化, 并且受内翻或外翻力矩的影响。康复活动亦可对前交叉韧带产生足够大的应力。单独的股四头肌收缩使膝关节接近伸直时产生较高的前交叉韧带的应力, 而相对于股四头肌单独收缩, 股四头肌和腘绳肌的协调收缩可减弱前交叉韧带的应力。受试者做快速急停起跳时, 当脚跟接触地面前交叉韧带应力达到最大峰值^[29]。研究显示前交叉韧带损伤时膝关节的活动主要发生在冠状面, 包括股骨内收内旋, 膝关节屈曲外翻, 胫骨旋转, 足和踝外翻。动作分析亦研究显示膝关节冠状面的外翻活动与前交叉韧带损伤有明显的关联性。

2.1.3 运动学分析 有研究对不同性别的大学生的跑、侧切步、跨步等活动进行运动学分析, 发现女子着地时膝关节屈曲角度更小一些, 并且在静止负重相膝关节更直立些。除了膝关节屈曲角度, 女子运动员还表现出在静止负重期膝关节的外翻角度较男性更大。膝关节在冠状面的外翻不完全来自胫骨围绕股骨旋转, 还包括髌关节的内旋, 并结合膝关节屈曲运动。运动中的表面肌电研究显示, 运动中女子运动员股四头肌肌肉募集活动较男性更活跃一些, 肌电峰值是最大等长收缩负荷时的2倍。女子运动员腘绳肌肌电活动相对较少, 只有最大负荷收缩时的一半。前交叉韧带损伤多发生在没有缓冲和不协调的着地时, 当

膝关节处于接近伸直的位置时, 在足刚开始接触地面时, 女性膝关节更容易伸展和有更多的股四头肌的肌电活动, 伸直的膝关节和更高的股四头肌的表面肌电活动可对前交叉韧带产生更大的应力^[30]。

在测力台上对男女运动员进行前跳急停、纵跳等动作的研究显示, 可通过测力台测算出人体相对测力台的剪切力, 并推算出前交叉韧带的应力^[31]。在所有跳的过程中女子运动员有更大的向前的剪切力, 最大的前交叉韧带应力发生在刚开始接触阶段。无论男性还是女性, 疲劳状态可增加向前的剪切力^[32]。

一项关于青年男子、女子足球运动员的运动学研究显示急停起跳落地, 11到12岁的青少年男子和女子有相似的膝关节屈曲角度和外翻角度, 但是女子自16岁开始着地时膝关节处于逐渐伸直状态^[33]。潜在的神经肌肉的不平衡可能与损伤机制相关, 女性相对于男性有更高的股四头肌的活性, 腘绳肌的募集男性比女性强, 腘绳肌和股四头肌峰力矩比值, 男性较女性为高^[34]。因为这些相似的损伤机制, 运动员应避免膝外翻, 落地时膝关节有更多的缓冲。另外肌肉力量和爆发力及激素环境在青春期后男女存在较大差异。随月经周期的变化女性激素的变化可影响韧带的特性, 使前交叉韧带发生损伤的风险提高。

男性在青春期力量、爆发力、身体协调性方面迅猛提高, 而女性则不同^[35-36]。缺少充足的神经肌肉能力来适应变长的下肢、变大的体质量, 这些不平衡可导致膝关节损伤风险的发生^[37-40]。落地机制、力量缓冲、肌肉募集和关节稳定性等方面的性别差异可通过神经肌肉的训练而改变^[41-43]。因此女性运动员在青春期的神经肌肉控制的训练可预防前交叉韧带损伤的发生。

2.2 非接触性前交叉韧带损伤预防 国内外对前交叉韧带损伤的预防进行了大量研究, 虽然评估前交叉韧带损伤风险的因素很多, 但只有生物力学的评估可用来进行监测并制定预防训练的计划。大部分预防计划倾向于本体感觉和神经肌肉控制的训练。研究多集中在生物力学方面, 但是研究的方法和有效性差异很大。大部分研究都不是随机样本, 只有少数研究是取随机样本, 尽管如此, 教练员仍可通过现有的研究来指导制定预防女子运动员前交叉韧带损伤的计划。

成功的训练计划包括很多因素, 包括: 传统的拉伸、力量训练, 了解高危动作姿势, 技术矫正、有氧能力、专项灵敏性、本体感觉、平衡能力、超等长训练等。

2.2.1 教育 Ettlinger等^[44]应用一个相对简单的方法来预防滑雪运动中前交叉韧带损伤, 研究者通过教育和提高导致损伤动作的认知力, 在这一非随机试验中, 1993至1994赛季, 对4 000名高山滑雪教练进行了培训, 培训的材料包括关于前交叉韧带损伤基本知识的录像资料, 并报道了10例不同水平前交叉韧带损伤的运动员, 理解前交叉韧带损伤的机制, 还有各种文字材料。通过这些教育使受

者能避免高危动作。参加者也进行了预防性的训练包括正确的身体姿势控制、有效地反应能力等。与干预以前的两个赛季进行比较,前两个赛季每个赛季发生了31例严重的前交叉韧带损伤,在进行干预的赛季,只发生了16例损伤,下降了62%。Cahill and Griffith^[126]对美国高中橄榄球队在赛季前进行抗阻练习下的协调训练和体能训练,观察训练的效果。通过4年的研究,他们发现膝关节损伤显著下降,在干预的人群中。

2.2.2 本体感觉训练 Caraffa等^[45]研究了单纯的本体感觉训练对预防足球运动员前交叉韧带损伤的作用,实验对象为600名半职业和业余的足球运动员,实验组共20支球队,10支业余球队,10支半专业球队,在赛季前进行了本体感觉训练。对照组同样20支球队,10支业余的,10支半专业的,按照原来的方式进行训练。干预组进行,5个进阶的平衡训练,包括:平衡板、直角平衡板,圆形平衡板,混合型平衡板,训练的时间和频率为每天进行20 min的练习,每周2-6 d,包括在赛季时每周至少3次。进行了3年的随访,对所有运动员进行了损伤风险的评估,结果在3个赛季中实验组有10例关节镜确诊的前交叉韧带损伤,对照组有70例。

2.2.3 神经肌肉训练 Henning^[46]对篮球女性运动员进行8年的随访,他认为不断增长的前交叉韧带损伤首先是功能性问题,并与膝关节在动态活动状态下的姿势相和肌肉控制有关。在伸膝过程中,股四头肌收缩牵拉胫骨使膝关节产生向前的应力,对前交叉韧带造成剪切力,相反的,膝关节屈曲过程中,胫骨向前的应力减小,由于腘绳肌的收缩前交叉韧带力矩减小。为了减少前交叉韧带损伤的风险, Henning建议运动员在做剪切动作、着地和减速时髌关节和膝关节应增加屈曲角度。他还建议运动员应该有良好的侧步习惯,不要紧急切步,切步的角度不要太大。另外在减速时应切忌一步骤停,而应该快速的三步减速。这项干预计划改变运动员的技术,着地时膝关节屈曲。该项研究通过改善篮球运动员的技术,减少了89%的前交叉韧带损伤发生。

2.2.4 本体感觉和力量训练 Wedderkopp等^[47]设计了一个预防前交叉韧带损伤的训练计划,包括功能性力量和平衡训练。22支运动队随机分成两组,11支队伍为干预组,111名队员,11个为控制组,126名队员。干预组发生14例损伤,而控制组发生66例损伤。

但是有的研究则显示通过预防干预没有明显差别, Irmischer等^[48]制定了膝关节韧带损伤预防的计划,包括15 min的力量训练和超等长训练,对象是高中女子足球、排球和篮球运动员。43个校队座位干预组,69个校队作为对照组,干预组发生3例前交叉韧带损伤,而对照组发生4例损伤,作者分析可能与干预的时间及执行的效果有关。

2.2.5 综合体能训练 其他研究进行了神经肌肉的训练

来预防前交叉韧带损伤,训练计划包括灵活性、力量训练和超等长训练等,为时60-90 min, Hewett等^[49]研究这项计划对高中足球、排球、篮球队员膝关节损伤预防的影响,43支球队1263名运动员实施了该项训练计划,其中15支女子运动队366名队员作为实验组,15支球队434名队员作为对照组。训练每周进行3 d,70%的运动员完成了6周的系统训练,其他的至少完成了4周训练。对照组发生膝关节损伤的比率是0.43/100,干预组为0.12/1000,干预组发生非接触前交叉韧带损伤的比率较对照组低。Olsen等^[50]研究青年手球队前交叉韧带损伤预防的训练方案。120个欧洲球队俱乐部参加了该项研究,干预组61支球队,958名队员,对照组59个队伍,879名队员。共进行了8个月的干预计划,包括4组训练,为时1520 min,训练内容包括热身运动,慢跑、向后跑、向前跑,侧向跑、速度训练)技术(切步、跳跃落地)平衡训练(深蹲、跳、力量训练和爆发力训练,每个队伍都由专业的教练指导来完成训练内容,并做成训练手册。训练计划着重正确的落地生物力学、核心稳定性和反馈技术。在干预组发生66例下肢损伤,对照组发生115例。19例急性损伤发生在干预组,38例发生在对照组。3例膝关节韧带损伤在干预组,14例在对照组,3例全部是前交叉韧带损伤,对照组10例前交叉韧带损伤。

很多干预训练计划需要特殊的设备、特殊的训练手段和时间。1999年,前交叉韧带预防前交叉韧带损伤并提高运动表现的训练计划(PEP, Prevent injury and Enhance Performance)在加利福尼亚提出。这项计划内容包括:热身、前身、力量训练、超等长训练和专项灵敏性训练,重点对膝关节周围稳定肌的力量和协调性短板进行训练,设计了一种热身以使训练内容在场地进行而不需要特殊的设备,只需要简单的仪器。在20 min内完成19项内容,一项早期的研究是对14到18岁的女子足球运动员,1041名女子足球运动员进行了PEP计划,1902名作为对照组,在第1年干预组发生了2例前交叉韧带损伤,对照组发生了32例损伤。前交叉韧带损伤下降了88%。第2年干预组发生4例前交叉韧带损伤,对照组发生35例损伤。

3 结语 Conclusion

研究表明预防性训练能减少前交叉韧带损伤发生的风险^[51-58],无论对男性、女性,无论对什么项目、什么年龄段都是有效的。预防性训练计划的设计应方便、廉价、有效,这样才适于推广。训练计划的干预应尽量提早,尤其在青春期前后对女子运动员的干预,有的项目在6-10岁就应该进行干预。一个好的训练计划,除了预防损伤,还可以提高运动表现,提高纵跳高度,提高膝关节动态负荷状态下的稳定性,发展平衡和提高腘绳肌的力量、提高核心控制能力。

作者贡献: 第一作者调研、分析文献, 并完成本综述, 第一作者对文章负责, 其他作者参与文献筛选。

利益冲突: 文章及内容不涉及相关利益冲突。

伦理要求: 没有与相关伦理道德冲突的内容。

学术术语: 前交叉韧带-又称前十字韧带, 位于膝关节内, 连接股骨与胫骨, 主要作用是限制胫骨向前过度移位, 它与膝关节内其他结构共同作用, 来维持膝关节的稳定性, 使人体能完成各种复杂和高难度的下肢动作。

作者声明: 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

4 参考文献 References

- [1] Faigenbaum AD, Kraemer WJ, Blimkie CJ, et al. Youth resistance training: updated position statement paper from the National Strength and Conditioning Association. *J Strength Cond Res.* 2009;23(5 suppl):S60-79.
- [2] Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, et al. of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med.* 1999;27:699-706.
- [3] Kim S, Bosque J, Meehan JP, et al. Increase in outpatient knee arthroscopy in the United States: a comparison of National Surveys of Ambulatory Surgery, 1996 and 2006. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93:994-1000.
- [4] Miyasaka KC, Daniel DM, Stone ML. The incidence of knee ligament injuries in the general population. *Am J Knee Surg.* 1991;4:43-48.
- [5] Gillquist J, Messner K. Anterior cruciate ligament reconstruction and the long-term incidence of gonarthrosis. *Sports Med.* 1999;27:143-156.
- [6] Gray J, Taunton JE, McKenzie DC, et al. A survey of injuries to the anterior cruciate ligament of the knee in female basketball players. *Int J Sports Med.* 1985;6:314-316.
- [7] Lohmander LS, Englund PM, Dahl LL, et al. The longterm consequence of anterior cruciate ligament and meniscus injuries: osteoarthritis. *Am J Sports Med.* 2007;35:1756-1769.
- [8] Lohmander LS, Ostergren A, Englund M, et al. High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury. *Arthritis Rheum.* 2004;50:3145-3152.
- [9] Griffin H, Agel J, Albohm MJ, et al. Non-contact anterior cruciate ligament injuries: risk factors and Prevention strategies. *J Am Orthop Surg.* 2000;8:141-150.
- [10] Arendt E, Dick R. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer: NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med.* 1995;23:694-701.
- [11] Chandy TA, Grana WA. Secondary school athletic injury in boys and girls: a three-year comparison. *Phys Sportsmed.* 1985;13:106-111.
- [12] Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, et al. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med.* 1999;27:699-706.
- [13] Malone TR, Hardaker WT, Garrett WE, et al. Relationship of gender to anterior cruciate ligament injuries in intercollegiate basketball players. *J South Orthop Assoc.* 1993;2:36-39.
- [14] Andrich JT. Anterior cruciate ligament injuries in the skeletally immature patient. *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* 2001;30:103-110.
- [15] Gallagher SS, Finison K, Guyer B, et al. The incidence of injuries among 87,000 Massachusetts children and adolescents: results of the 1980-81 Statewide Childhood Injury Prevention Program Surveillance System. *Am J Public Health.* 1984;74:1340-1347.
- [16] Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1. Mechanisms and risk factors. *Am J Sports Med.* 2006;34:299-311.
- [17] Quatman CE, Ford KR, Myer GD, et al. Maturation leads to gender differences in landing force and vertical jump performance: a longitudinal study. *Am J Sports Med.* 2006;34:806-813.
- [18] Levine JW, Kiapour AM, Quatman CE, et al. Clinically relevant injury patterns after an anterior cruciate ligament injury provide insight into injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 2013;41(2):385-395.
- [19] Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Jr, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 2000;23:573-578.
- [20] Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med.* 2004;32:1002-1012.
- [21] Griffin L Y, Teitz CC. Video analysis of ACL injuries. In: Griffin L Y, ed. *Prevention of noncontact ACL injuries.* Rosemont, IL: American Association of Orthopaedic Surgeons. 2001:87-92.
- [22] Krosshaug T, Nakamae A, Boden BP, et al. Estimating 3D joint kinematics from video sequences of running and cutting manoeuvres: assessing the accuracy of simple visual inspection. *Gait Posture.* 2007;26:378-385.
- [23] Markolf KL, Graff-Radford A, Amstutz HC. In vivo knee stability. A quantitative assessment using an instrumented clinical testing apparatus. *J Bone Joint Surg Am.* 1978;60:664-674.
- [24] Berns GS, Hull ML, Patterson HA. Strain in the anteromedial bundle of the anterior cruciate ligament under combination loading. *J Orthop Res.* 1992;10:167-76.
- [25] Arms SW, Pope MH, Johnson RJ, et al. The biomechanics of anterior cruciate ligament rehabilitation and reconstruction. *Am J Sports Med.* 1984;12:8-18.
- [26] DeMorat G, Weinhold P, Blackburn T, et al. Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2004;32:477-83.
- [27] Withrow TJ, Huston LJ, Wojtys EM, et al. The effect of an impulsive knee valgus moment on in vitro relative ACL strain during a simulated jump landing. *Clin Biomech.* 2006;21:977-983.
- [28] Fleming BC, Ohlén G, Renström PA, et al. The effects of compressive load and knee joint torque on peak anterior cruciate ligament strains. *Am J Sports Med.* 2003;31:701-707.
- [29] Cerulli G, Benoit DL, Lamontagne M, et al. In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: case report. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2003;11:307-311.
- [30] 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.* 2001;16:438-45.

- [31] Chappell JD, Creighton RA, Giuliani C, et al. Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: risks for noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2007;35:235-41 .
- [32] Weinhold PS, Stewart JD, Liu HY, et al. The influence of gender-specific loading patterns of the stop-jump task on anterior cruciate ligament strain. *Injury* 2007;38:973-978 .
- [33] Yu B, Lin CF, Garrett WE. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clin Biomech.* 2006; 21:297-305 .
- [34] Ford KR, Myer GD, Toms HE, et al. Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37:124-129 .
- [35] Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *J Bone Joint Surg Am.* 2004;86:1601-1608.
- [36] Quatman CE, Ford KR, Myer GD, et al. Maturation leads to gender differences in landing force and vertical jump performance: a longitudinal study. *Am J Sports Med.* 2006; 34:806-813.
- [37] Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *J Bone Joint Surg Am.* 2004;86:1601-1608.
- [38] Hewett TE, Myer GD, Ford KR, et al. Preparticipation physical examination using a box drop vertical jump test in young athletes: the effects of puberty and sex. *Clin J Sport Med.* 2006;16:298-304.
- [39] Myer GD, Ford KR, Divine JG, et al. Longitudinal assessment of noncontact anterior cruciate ligament injury risk factors during maturation in a female athlete: a case report. *J Athl Train.* 2009;44:101-109.
- [40] Quatman CE, Ford KR, Myer GD, et al. The effects of gender and pubertal status on generalized joint laxity in young athletes. *J Sci Med Sport.* 2008;11:257-263.
- [41] Hewett TE, Stroupe AL, Nance TA, et al. Plyometric training in female athletes: decreased impact forces and increased hamstring torques. *Am J Sports Med.* 1996;24:765-773.
- [42] Myer GD, Brunner HI, Melson PG, et al. Specialized neuromuscular training to improve neuromuscular function and biomechanics in a patient with quiescent juvenile rheumatoid arthritis. *Phys Ther.* 2005;85:791-802.
- [43] Paterno MV, Myer GD, Ford KR, et al. Neuromuscular training improves single-limb stability in young female athletes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2004;34:305-316.
- [44] Ettlinger CF, Johnson RJ, Shealy JE. A method to help reduce the risk of serious knee sprains incurred in alpine skiing. *Am J Sports Med.* 1995;23:531-7 .
- [45] Caraffa A, Cerulli G, Progetti M, et al. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1996;4:19-21 .
- [46] Henning CEGN. Injury prevention of the anterior cruciate ligament (videotape). Wichita Kansas: Mid-America Center for Sports Medicine. 1990.
- [47] Wedderkopp N, Kaltoft M, Lundgaard B, et al. Prevention of injuries in young female players in European team handball. A prospective intervention study. *Scand J Med Sci Sports.* 1999; 9:41-7 .
- [48] Irmischer BS, Harris C, Pfeiffer RP, et al. Effects of a knee ligament injury prevention exercise program on impact forces in women. *J Strength Cond Res.* 2004;18:703-7 .
- [49] Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, et al. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med* 1999; 27:669-706 .
- [50] Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Exercises to prevent lower limb injuries in youth sports: cluster randomised controlled trial. *BMJ.* 2005;330:449.
- [51] Labella CR, Hennrikus W, Hewett TE. Anterior Cruciate Ligament Injuries: Diagnosis, Treatment, and Prevention. *Pediatrics.* 2014 Apr 28. [Epub ahead of print].
- [52] Beynon BD, Hall JS, Sturnick DR, et al. Increased slope of the lateral tibial plateau subchondral bone is associated with greater risk of noncontact ACL injury in females but not in males: a prospective cohort study with a nested, matched case-control analysis. *Am J Sports Med.* 2014;42(5): 1039-1048.
- [53] Noyes FR, Barber-Westin SD. Neuromuscular retraining intervention programs: do they reduce noncontact anterior cruciate ligament injury rates in adolescent female athletes? *Arthroscopy.* 2014;30(2):245-255.
- [54] Lehr ME, Plisky PJ, Butler RJ, et al. Field-expedient screening and injury risk algorithm categories as predictors of noncontact lower extremity injury. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(4):e225-32.
- [55] Ladenhauf HN, Graziano J, Marx RG. Anterior cruciate ligament prevention strategies: are they effective in young athletes - current concepts and review of literature. *Curr Opin Pediatr.* 2013;25(1):64-71.
- [56] Donnelly CJ, Elliott BC, Ackland TR, et al. An anterior cruciate ligament injury prevention framework: incorporating the recent evidence. *Res Sports Med.* 2012;20(3-4):239-262.
- [57] Paszkevicz J, Webb T, Waters B, et al. The effectiveness of injury-prevention programs in reducing the incidence of anterior cruciate ligament sprains in adolescent athletes. *J Sport Rehabil.* 2012;21(4):371-377.
- [58] Bien DP. Rationale and implementation of anterior cruciate ligament injury prevention warm-up programs in female athletes. *J Strength Cond Res.* 2011;25(1):271-285.