

踝关节扭伤的生物力学与运动学研究进展

赵勇,王钢

(中国中医科学院望京医院骨伤综合科,北京 100102)

【摘要】 踝关节扭伤是骨科临床常见病,占关节韧带扭伤的首位,如治疗不及时或不恰当,常遗留疼痛及关节不稳,继而发生骨关节炎等。目前踝关节的损伤机制、解剖学基础等已经得到了充分的研究,其诊断问题已经很明确,随着科学技术日新月异的发展,生物建模与三维有限元、三维运动捕捉系统、数字化技术的研究、体表肌电研究等技术被用于踝关节扭伤的基础研究之中,使踝关节扭伤的生物力学与运动学研究得到发挥,现结合踝关节的损伤机制等,探讨踝关节扭伤的生物力学与运动学研究进展。

【关键词】 生物力学; 运动学; 踝关节; 扭伤

DOI:10.3969/j.issn.1003-0034.2015.04.019

Advances on biomechanics and kinematics of sprain of ankle joint ZHAO Yong and WANG Gang. Synthetic Department of Orthopaedics, Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China

ABSTRACT Ankle sprains are orthopedic clinical common disease, accounting for joint ligament sprain of the first place. If treatment is not timely or appropriate, the joint pain and instability maybe develop, and even bone arthritis maybe develop. The mechanism of injury of ankle joint, anatomical basis has been fully study at present, and the diagnostic problem is very clear. Along with the development of science and technology, biological modeling and three-dimensional finite element, three-dimensional motion capture system, digital technology study, electromyographic signal study were used for the basic research of sprain of ankle. Biomechanical and kinematic study of ankle sprain has received adequate attention, combined with the mechanism research of ankle sprain, and to explore the the biomechanics and kinematics research progress of the sprain of ankle joint.

KEYWORDS Biomechanics; Kinematics; Ankle joint; Sprains

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2015, 28(4):374-377 www.zggszz.com

踝关节是人体负重最大的屈戌关节,站立时全身重量均落在踝关节上,行走时的负荷值为体重的5倍,因此急性踝关节扭伤是日常生活中最易发生的外伤。踝关节周围韧带扭伤发病率在全身各关节韧带扭伤中占首位^[1]。在美国,每天大约有23 000例踝关节扭伤患者^[2]。踝关节扭伤在临床甚为常见,但尚不能引起很多人的重视,如处理不当会致韧带松弛,瘢痕形成,踝关节不稳,以致反复扭伤,日后易发生创伤性关节炎。

1 损伤机制

因踝关节外侧韧带不如内侧的三角韧带坚强,外踝比内踝低1.2 cm,因此绝大部分急性踝关节扭伤患者中损伤的是外侧韧带,踝关节跖屈时内翻是损伤时的典型姿势。在踝关节跖屈情况下,内翻应力或内旋应力即可导致损伤。踝关节背伸或跖屈,距骨均与踝穴内各关节面紧密接触^[3]。另外,与踝关节扭伤关系最为密切的是关节周围的韧带结构。踝关节

的韧带结构主要包括两个韧带复合体,分别为下胫腓复合体及内外侧副韧带系统^[4]。根据对踝关节影像学认识,Glasgow^[5]通过摄应力片观察到,距腓前韧带断裂后踝关节可产生前向不稳定甚至半脱位。Karlsson^[6]应用Telos架拍摄应力位片,进一步量化了外踝韧带损伤后的踝关节前向不稳定。但关于距骨前移距离的判定标准并不统一,文献报道多以ATT 6~10 mm、 Δ ATT \geq 3 mm作为阳性指标^[7]。Rubin等^[8]报道正常踝关节距骨倾斜角在0°~23°;而Cox等^[9]通过对404例踝关节的测定提出距骨倾斜角的正常值 $<5^\circ$,国外文献也多以TT 4°~10°、 Δ TT \geq 3°作为诊断慢性踝关节不稳定的阳性指标^[7]。Bahr等^[10]通过分别切断不同的外侧副韧带进行测量比较,结果显示:距腓前韧带在跖屈下所受应力最大,跟腓韧带则在背伸下应力最大,并发现单独的距腓前韧带损伤仅引起较轻的韧带松弛,而在距腓前韧带和跟腓韧带同时损伤下韧带松弛则明显增加。而Ozeki等^[11]也通过12例新鲜冰冻标本的研究表明,当踝关节跖屈16.4°时,距腓前韧带达到最长,张力最大,此时易发生距腓前韧带断裂,而距腓后韧带和跟腓韧

通讯作者:赵勇 E-mail:zhaoyong423@sohu.com

Corresponding author:ZHAO Yong E-mail:zhaoyong423@sohu.com

带则分别在踝关节背伸 18° 、 17.8° 时达到最长, 张力最大。当在高低不平的道路上行走、跑步、跳跃或下楼梯时, 踝关节处多发生于运动创伤, 也可发生于一般的行走等情况下的扭伤, 因其损伤机制的各异, 临床表现有轻重不同。由此可以发现踝关节的损伤机制与踝关节骨折有相似的地方, 但又有不同之处。

2 踝关节损伤的生物力学分析

2.1 踝关节的运动形式

踝关节中, 足与小腿正常位置时成直角, 运动时小腿与足背之间的角度增大称为趾屈, 反之则为背屈。在正常位置中, 踝关节通过周围韧带的加强是不易于侧向运动而易于屈伸运动的。在运动中, 足的内侧缘被提起足底转向内侧称为内翻。反之, 当足的外侧缘提起, 足底转向外侧的时候则称为外翻。

2.2 踝关节的基本力学特性

踝关节在跑跳运动中起重要作用。踝关节力量的强弱直接关系到完成动作时支撑整个身体的稳定性, 包括决定上肢环节作用的效率以及参与工作的早晚, 如果踝关节具有足够的力量, 便可提前参与运动, 从而缩短整个动作完成的时间, 提高动作的速率, 因此, 在起跳蹬伸与缓冲阶段时, 踝关节的运动是由小腿三头肌肌腱的弹性形变与复原进行的。

2.3 踝关节稳定性的力学分析

所谓踝关节的稳定性, 指的是距骨滑车在关节窝内的稳定性, 当较宽的滑车前部嵌入关节窝时, 踝关节较稳定, 反之, 当较窄的滑车后部进入关节窝内, 则足只能作轻微的侧向运动, 关节不够稳定。与此同时, 距下关节在保持踝关节稳定性方面也起到了重要的作用。作为一个衔接的枢纽, 距下关节可以使小腿在足负重的情况下进行旋转。运动员不间断地作跑跳等动作, 人体重心不断变化, 只有下肢位置的固定才能更有效地支持上肢完成各种技术动作。同时从生物力学的角度来说, 地面反作用力作用在足部的同时还可以产生一个瞬时的力作用在距下关节, 由于足部在重心以下, 用以支撑整个躯干, 所以其位置可以直接影响地面反作用力通过压力中心的各种表现。踝关节姿态的正确与否主要表现在距下关节所在的位置, 而体位的旋转则主要发生在压力中心周围。同时, 踝关节的协同运动, 也就是所谓踝关节姿态的正确性, 主要表现在通过反方向的作用力和外翻来保持重心以下足的稳定。踝关节的衔接还借助前后距腓韧带和踝关节囊来维持。

3 踝关节损伤的生物力学与运动学研究进展

3.1 生物建模与三维有限元

采用生物建模来对足部的应力分布进行研究可以为踝关节落地损伤提供足部生理学和病理学方面

的证据, 建立适当的踝关节生物力学模型成为足部生物力学研究的重点。三维有限元技术可以利用 CT 或 MRI 扫描技术获取正常踝关节的各种三维坐标值, 然后输入有限元分析软件而建立起踝关节的有限元模型。它不仅可以有效地仿真人体骨骼肌肉系统, 还可以推测内部骨组织及软组织的应力分布变化^[12]。陶凯等^[13]运用三维有限元模型量化了不同姿势下的足底压力分布、踝关节内部软组织应力分布以及跳起着陆时足弓的变形对足部生物力学特性的影响。目前生物建模与三维有限元研究在骨骼及软组织等研究已经越来越普遍, 但这些研究大部分着眼于运动状态下或者损伤当时的时间点, 对于损伤后组织在 2 周内的修复过程中的三维建模尚缺乏定论, 尤其在手术后或者多种多样保守治疗后的力学对比研究尚有缺乏, 对于急性踝关节扭伤是如何转变为陈旧损伤的也需要进一步探讨。

3.2 踝关节损伤的运动学研究

体育运动中踝关节的运动学研究早期集中于使用高速摄像来分析着陆过程。高速摄影可以得到受试者跳起着地时踝关节的落地速度、角度和运动时间, 进而可以通过牛顿运动定律计算出踝关节所受到的着陆冲击力。随着技术的进步, 对着陆伤运动学的研究又有了新的工具。目前运动生物力学实验中使用较多的是三维运动捕捉系统。三维运动捕捉系统可以通过受试者身上的标记物来捕捉人体运动的轨迹。它可以通过相应的软件精确输出运动时间、运动速度、加速度、各方向的关节角位移及角速度等相关运动学参数。井兰香等^[14]运用三维运动捕捉系统结合测力台技术对篮球运动员的负重超等长训练后下肢踝关节的动力学和刚度的变化进行研究, 指出经过等长训练可以提高踝关节的动力学和刚性参数, 同时可以降低踝关节损伤的风险。Yeow 等^[15]运用三维运动捕捉系统结合测力台技术比较了男女运动员的跳起落地踝关节角度和角速度的差异。另外, 此项技术可与三维有限元结合, 对动态运动进行造模, 使踝关节在整个运动过程中的力学变化得到突出标注。

3.3 动力学方面的研究

体育运动中跳起着地的踝关节损伤通常与足底受的地面冲击力超过了机体所能承受力的极限有关, 因此, 地面反作用力的检测在踝关节着陆损伤的研究中占有重要地位。目前, 国内外踝关节的动力学研究中最常使用的是三维测力台系统, 可以测出着陆面垂直、前后和侧向力的分布, 借助相关软件还可以推算出相应 3 个方向的力矩和压力中心轨迹。Chu 等^[16]使用三维测力台结合运动捕捉系统对体育

运动中经常导致关节扭伤的动作进行研究, 得出了各种动作下的踝关节内翻角度和地面的反作用力。Lida 等^[17]运用三维测力台模拟运动员跳起着地时地面冲击力的吸收过程, 指出了中枢运动控制对踝关节运动学参数的影响。Madigan^[18]运用三维测力台研究地面作用力与下肢肌肉疲劳之间关系发现: 落地前下肢肌肉的疲劳会影响下肢关节屈曲幅度, 进而导致下肢受到的地面冲击力增加。踝关节的稳定性与下肢肌肉的疲劳程度息息相关, 通过动力学研究, 可以将肌肉疲劳程度与踝关节扭伤进行量化分析, 可以大大减少踝关节扭伤的发生。

3.4 数字化技术的研究

足底压力测量技术的发展经过了足印技术、足底压力扫描技术、力板与测力台技术、压力鞋与鞋垫技术^[19]。三维测力台虽可以准确测量地面反作用力及分布, 但无法测出“足-鞋界面”的压力。足底压力鞋垫很好的解决了这一问题。由于鞋垫与足底贴服, 故它可以测量“足-鞋界面”压力的连续参数, 并进行实时监测和反馈。目前, 在生物力学研究中运用最广泛的鞋垫是比利时 F-Scan 测力鞋垫和德国 Pedar 测力鞋垫。设计者把传感器按足底的解剖位置排列, 加上衬垫, 做成鞋垫, 当人穿此鞋站立或行走时, 传感器的输出发生变化, 数据经处理后, 可以得到连续的步态压力曲线。Fong 等^[20]通过足底压力鞋垫 3PS 对体育运动中踝关节后旋力矩进行检测, 评估了落地时踝关节在不同姿势的损伤风险。踝关节的力学传导必然与足部的力学相关, 从足部的测力鞋垫, 可以从侧面部分显示踝关节的功能, 另外, 测力鞋垫更加方便, 可以长时间的分析力学数据, 并且可以在第一时间得到最真实的力学变化。

3.5 表面肌电的研究

体育运动中跳起落地时踝关节肌肉的运动可为关节运动提供动力并可保证关节的协调性。着陆时, 下肢肌肉力量不足会导致落地姿势动作的不到位, 进而增加踝关节损伤的风险。另外踝关节肌肉的慢性疲劳也是体育人员跳起落地踝关节损伤的一个重要因素。Lida 等^[17]运用表面肌电技术对着陆缓冲过程的下肢肌肉的协调性进行了研究, 证实了中枢运动控制在踝关节落地运动协调上的作用。Österberg 等^[21]在研究重复提踵测试时踝关节肌肉疲劳的过程中发现限制提踵动作继续完成的并不是肌肉力量的峰值, 而是由于肌肉疲劳导致不能维持动作的预定范围。表面肌电活性与肌肉的活动状态和功能之间存在着一定程度的关联性, 能在一定程度上反映神经肌肉的活性。表面肌电图(sEMG)技术是通过肌电图仪采集肌肉表面电信号并加以分析的方

法。应用 sEMG 信号特征可以预测骨骼肌纤维类型, 评估力量训练, 检测肌肉损伤, 测定人体活动的反应时、运动时和电机械延迟以及其与肌肉组织代谢的关系。

4 展望

急性踝关节扭伤是临床常见的一种运动性软组织损伤疾病。随着现代诊断技术的日益进步, X 线片及核磁等诊疗技术越来越多的应用于医疗诊断之中, 从而从另外多个角度对踝关节扭伤的力学机制和运动学机制进行阐述。Cheung 等^[22]运用 MRI 图像建立了高度解剖学相似的踝部有限元模型, 具体量化分析了足底软组织硬度和对足底压力和骨骼应力分布的影响。运用此技术可以对新型运动鞋垫的设计方案提高理论支持。同传统生物力学的研究相比, 三维有限元法还具有费用低、应用广、适应性强的优点。Ergen 等^[23]运用三维运动捕捉系统对有踝关节扭伤的足球运动员进行了研究, 比较了踝关节护具和热身训练对踝关节的防护的影响。Niu 等^[24]通过检测下肢落地时的表面肌电信号对运动员着陆双下肢肌电活动的差异进行了研究, 他指出了运动员着地时的双侧踝关节屈曲肌群活动性存在明显差异。通过科学技术的进一步发展, 相信会有越来越多的新式检查手段得以运用于临床, 由此衍生出的生物建模与三维有限元、三维运动捕捉系统、数字化技术的研究、体表肌电研究等技术也随即会被用于踝关节扭伤的基础研究之中^[25]。另外踝关节扭伤的损伤机制及力学变化目前已经得到了明确的研究, 但是通过手术或者保守治疗后, 踝关节的生物力学与运动学是如何得以改善, 踝关节的韧带等软组织修复, 尚缺乏影像学等的支持, 这也将是进一步拓宽治疗方法的开门红。

目前, 踝关节扭伤的生物力学与运动学研究大部分集中于静态力学分析与运动员的跑步、跳跃等动态动作, 在日常生活里, 因肌肉疲劳等因素的踝关节扭伤研究不够充分。这给临床治疗带来了困难。而上述各种科学技术如何相互结合, 如何发挥叠加的最佳分析, 如何通过客观的指标量化其扭伤程度, 值得深入研究。另外, 现代生物力学与运动学研究对于踝关节扭伤的基础研究方面有非常明显的研究前景和优势。相信随着现代科学技术的进一步发展, 这一优势将会更加明显, 类似于运动手表的各种关节测评工具会越来越多。

参考文献

- [1] 姚太顺, 孟宪杰. 踝关节外科[M]. 北京: 中国中医药出版社, 1998: 173.
Yao TS, Meng XJ. Ankle Surgery[M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 1998: 173. Chinese.

- [2] Pijnenburg AC, Van Dijk CN, Bossuyp PM, et al. Treatment of ruptures of the lateral ankle ligaments: a meta-analysis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2000, 82(6): 761-773.
- [3] 王亦聰. 骨与关节损伤[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 1498-1499.
Wang YC. Bone and Joint Injury[M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2009: 1498-1499. Chinese.
- [4] 姚太顺. 足部损伤[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 25-27.
Yao TS. The Foot Injury[M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2008: 25-27. Chinese.
- [5] Glasgow MJ, Jackson A, Jamieson AM. Instability of the ankle injury to the lateral ligament[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1980, 62(2): 196-200.
- [6] Karlsson J. Chronic lateral instability of the ankle joint: clinical, radiological and experiment study[D]. Medical Dissertation. Goteborg, 1989.25.
- [7] 祖晓水, 戴尅戎, 侯筱魁. 踝关节外侧副韧带损伤的研究现状[J]. *中华创伤杂志*, 1995, 11(1): 55.
Zu XS, Dai KR, Hou XK. Research status of ankle joint lateral collateral ligament injury[J]. *Zhonghua Chuang Shang Za Zhi*, 1995, 11(1): 55. Chinese.
- [8] Rubin G, Witten M. The talar tilt angle and the fibular collateral ligaments[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1960, 42: 311.
- [9] Cox JS, Hewes TF. Normal talar tilt angle[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1979, 140: 37-41.
- [10] Bahr R, Pena F, Shine J, et al. Biomechanics of ankle ligament reconstruction. An in vitro comparison of the Broström repair, Watson Jones reconstruction, and a new anatomic reconstruction technique[J]. *Am J Sports Med*, 1997, 25(4): 424-432.
- [11] Ozeki S, Yasuda K, Kaneda K, et al. Simultaneous strain measurement with determination of a zero strain reference for the medial and lateral ligaments of the ankle[J]. *Foot Ankle Int*, 2002, 23, (9): 825-832.
- [12] Pekedis M, Ozan F, Yildiz H. Developing of a three dimensional foot ankle model based on CT images and non-linear analysis of anterior drawer test by using the finite element method[J]. *J Biomech*, 2011, 44(1): 14.
- [13] 陶凯, 王冬梅, 王成焘, 等. 基于三维有限元静态分析的人体足部生物力学研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26(5): 764-780.
Tao K, Wang DM, Wang CT, et al. Biomechanical study of the human foot based on a 3D finite element analysis[J]. *Zhongguo Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Bao*, 2007, 26(5): 764-780. Chinese.
- [14] 井兰香, 刘宇. 篮球运动员 8 周负重超等长训练后下肢及髌、膝、踝关节动力学和刚度变化[J]. *中国运动医学杂志*, 2010, 29(4): 417-421.
Jing LX, Liu Y. Basketball player 8 weeks plyometric weight training after lower extremity and hip, knee, ankle joint kinetics and stiffness variation[J]. *Zhongguo Yun Dong Yi Xue Za Zhi*, 2010, 29(4): 417-421. Chinese.
- [15] Yeow CH, Lee PV, Goh JC. Effect of landing height on frontal plane kinematic, kinetic and energy dissipation at lower extremity[J]. *J Biomech*, 2009, 42(12): 1967-1973.
- [16] Chu VW, Fong DT, Chan YY, et al. Differentiation of ankle sprain motion and common sporting motion by ankle inversion velocity[J]. *J Biomech*, 2010, 43(10): 2035-2038.
- [17] Lida Y, Kanehisa H, Inaba Y, et al. Activity modulations and lower limb muscles during impact-absorbing landing[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2011, 21(4): 602-609.
- [18] Madigan ML, Pidcoe PE. Changes in landing biomechanics during a fatiguing landing activity[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2003, 13(5): 491-498.
- [19] 李建设, 王立平. 足底压力测量技术在生物力学研究中的应用与进展[J]. *北京体育大学学报*, 2005, 28(2): 191-193.
Li JS, Wang LP. Application and progress of plantar pressure measurement in biomechanical research[J]. *Bei Jing Ti Yu Da Xue Xue Bao*, 2005, 28(2): 191-193. Chinese.
- [20] Fong DT, Chan YY, Hong Yet al. A three-pressure-sensor (3PS) system for monitoring ankle supination torque during sport motions[J]. *J Biomech*, 2008, 41(11): 2562-2566.
- [21] Österberg U, Svantesson U, Takahashi H, et al. Torque, work and EMG development in a heel-rise test[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 1998, 13(4-5): 344-350.
- [22] Cheung JT, Zhang M, Leung AK, et al. Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing—a material sensitivity study[J]. *J Biomech*, 2005, 38(5): 1045-1054.
- [23] Ergen E, Ulkar B. Proprioception and ankle injuries in soccer[J]. *Clin Sports Med*, 2008, 27(1): 195-217.
- [24] Niu W, Wang Y, Fan Y, et al. Kinematics, kinetics and electromyogram of ankle during drop landing: a comparison between dominant and non-dominant limb[J]. *Hum Mov Sci*, 2011, 30(3): 614-623.
- [25] 孙永生, 温建民, 吴林生, 等. 骨折三期治疗对骨生长因子 FGF-2 表达影响的实验研究[J]. *中国骨伤*, 2004, 17(4): 222-226.
Sun YS, Wen JM, Wu LS, et al. Experimental study of effects of the three-phase treatment in TCM for fracture on FGF-2 expression during fracture healing in rats[J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2004, 17(4): 222-226. Chinese.

(收稿日期: 2014-01-03 本文编辑: 李宜)