

# 功能性踝关节不稳的生物力学研究进展

展利东<sup>1</sup>,路玲玲<sup>1</sup>,赵晓东<sup>1</sup>,吴照凤<sup>1</sup>,丁学琛<sup>2</sup>,任格<sup>2</sup>,王理康<sup>1</sup>

【关键词】 功能性踝关节不稳;生物力学;综述

【中图分类号】 R49;R743.3 【DOI】 10.3870/zgkf.2023.08.014

慢性踝关节不稳是指踝关节扭伤后未经系统治疗或治疗不当出现的踝关节长期慢性疼痛及反复扭伤的疾病。其中以外侧损伤最为常见,约占90%<sup>[1]</sup>。临床分为机械性踝关节不稳(mechanical ankle instability, MAI)和功能性踝关节不稳(functional ankle instability, FAI)。其中FAI是指踝关节无解剖结构的异常,由本体感觉<sup>[2]</sup>、肌力<sup>[3]</sup>和姿势控制<sup>[4]</sup>缺陷导致的踝关节不稳定。研究显示,美国平均每年踝关节扭伤者达200万,仅约10%得到了及时正确的康复治疗<sup>[5]</sup>,初次踝关节扭伤后,约有40%的患者可发展成为慢性踝关节不稳,其中以FAI最为常见,占慢性踝关节不稳的60%<sup>[6]</sup>。近年来对FAI的研究主要集中在本体感觉及姿势控制等方面,而对FAI的生物力学研究相对较少。生物力学是应用力学原理和方法对生物体中的力学问题定量研究的生物物理学分支,运动生物力学是生物力学的分支,是以人体的解剖学、生理学和力学的理论与方法,研究人体运动系统的生物力学特性和人体运动的力学规律的科学。笔者认为,生物力学研究可以从一种新的角度阐明FAI的发生机制,为早期治疗及后期康复提供理论依据,利于患者踝关节功能的尽早恢复,指导临床诊疗方案的制订。现就近年对FAI的生物力学研究做一综述。

## 1 FAI踝关节周围组织生物力学改变

踝关节扭伤是一个复杂的病理过程,涉及踝关节多个结构的损伤,包括韧带、关节囊、软骨,甚至骨等。由于治疗方式及个体差异,在后期往往会遗留韧带和软骨的损伤,而这也恰恰是造成踝关节生物力学改变的结构基础,使关节应力和旋转角度发生改变。

1.1 踝关节周围韧带的生物力学改变 研究显示,在

踝关节扭伤的患者中,距腓前韧带损伤占85.3%,跟腓韧带损伤占34.5%,最常见的损伤类型为单纯性距腓前韧带损伤和距腓前韧带合并跟腓韧带损伤,分别占39.9%和19.1%<sup>[7]</sup>,因为这两条韧带是对抗踝关节过度内翻的主要结构。

韧带损伤是FAI患者感觉“不稳”的主要原因,踝关节活动度可以直接反应韧带的损伤情况,现多以新鲜冷冻踝关节标本为研究对象,测量不同干预措施中踝关节的活动度<sup>[8-10]</sup>。研究的热点同样主要集中在距腓前韧带和跟腓韧带两个关键点。Takeuchi等<sup>[11]</sup>将6具新鲜冷冻踝关节(足底向上)垂直固定,在足底固定一块亚克力板及一块圆形钢板,并在钢板上按钟表方向以30°为间隔做好标记,同时钢板有一25cm长的悬臂,并悬吊0.5kg重量,以悬臂按顺时针方向旋转模仿踝关节的背伸、内翻及外翻动作,同时将感应探头插入距腓前韧带中,以感应距腓前韧带在这一过程中的张力变化。结果显示距腓前韧带在内翻2点和3点位置张力最大,在7点位置张力最小。因此当踝关节急剧内翻时,极易损伤距腓前韧带。Guerra-Pinto等<sup>[12]</sup>以15例健康踝关节为基础进行了踝关节韧带与活动度相关性的研究。结果显示,完整踝关节的距骨内旋角度为 $3.67 \pm 1.2^\circ$ ,距腓前韧带切断后为 $9.6 \pm 3.2^\circ$ ,距腓前韧带和跟腓韧带切断后为 $13.43 \pm 3.2^\circ$ 。表明距腓前韧带单一切断后距小腿内旋角度增加近3倍,距腓前韧带和跟腓韧带双切断后增加近4倍。因此距腓前韧带和跟腓韧带损伤会造成踝关节极大的不稳定。

一般认为,距腓前韧带与跟腓韧带是维持踝关节外侧稳定的主要结构,也是FAI患者最易损伤的韧带。以上研究也证实,这两条韧带损伤后确实会造成踝关节内翻角度大幅度增加,从而容易造成反复扭伤。但同时Yoshizuka等<sup>[13]</sup>的研究表明,紧张的跟腓韧带可以向外侧抬高腓骨长短肌,起到“张力器”的作用,从而使腓骨长短肌紧张,对抗踝关节的过度内翻。因此我们也要注意强调腓骨长短肌对抗踝关节过度内翻的作用。因为肌肉和韧带损伤后恢复时间存在差异,我们强调韧带康复的同时要注重腓骨长短肌的训练,使

基金项目:北京市海淀区卫生健康发展科研培育项目(HP2021-21-80402)

收稿日期:2022-11-20

作者单位:1.解放军总医院第三医学中心康复医学科,北京100039;2.山西中医药大学针灸学院,山西晋中030002

作者简介:展利东(1990-),男,硕士研究生,主要从事康复医学方面的研究。

通讯作者:王理康,wlk0306@126.com

踝关节内翻尽早得到纠正,以早期预防再次扭伤。

1.2 踝关节应力的改变 FAI患者生物力学改变的另一个方面是关节应力的改变,长时间关节应力的改变是形成慢性疼痛及骨关节炎的主要原因。现临床可在动态和静态两种状态下,通过地面反作用力、肌电图及关节内部的应力改变等多个方面研究踝关节应力的变化。

周莉等<sup>[14]</sup>将32例FAI患者的患侧表面肌电图与健侧相关信息比较,结果显示FAI患者健侧胫前肌中位频率和腓骨长肌积分肌电值显著优于患侧,由此可以推断健侧胫前肌及腓骨长肌单位时间的收缩能力显著优于患侧。Herb等<sup>[15]</sup>在参与者进行10次垂直跳跃时,同步收集了踝关节的运动学、动力学、表面肌电图和地面反作用力数据。结果显示FAI患者在接触地面后107~200ms内翻较大,11~71ms内跖屈运动较小,11~77ms和107~200ms有较大的踝矢状面运动学变化,与正常对照组存在较大差异。FAI患者在接触地面后94~98ms的地面反作用力和17~128ms的腓骨活动性均高于对照组。由于足内翻伴跖屈是最常见的踝关节扭伤机制,这一系列改变说明FAI患者在跳跃过程中的运动模式发生改变,一方面表明了这个过程中FAI患者的踝关节更易内翻,造成踝关节的再次损伤,另一方面表明存在防止过度内翻机制,最大程度保护不稳定的踝关节,防止再次损伤。

Marta等<sup>[16]</sup>建立了一个正常踝关节的3D有限元模型,在正常踝关节、切断距腓前韧带、切断距腓前韧带和跟腓韧带3种情况下评估胫骨软骨、腓骨软骨和距骨软骨之间应力的改变。结果表明,随着内翻的增加,接触压力模式不仅发生了变化,而且所有软骨的最大接触压力都有所增加。因此由于韧带损伤,FAI患者关节软骨会不同程度地失去原有的接触模式,同时也必须承受更强的压力负荷,使软骨受到进一步损伤。Torp等<sup>[17]</sup>研究了视觉和听觉生物反馈对FAI患者运动生物力学的实时影响。结果显示视觉生物反馈增加了后跟外侧压力以及后跟外侧和足中压力-时间积分。听觉生物反馈增加了踏步时的脚跟压力,降低了弓步时的前足外侧压力-时间积分。因此FAI患者能够通过视觉和听觉生物反馈改变踝关节的压力分布,改善踝关节不稳状态。

踝关节的应力改变是形成骨关节炎的主要原因。关节软骨的反复破坏与修复会导致钙化的形成,并且会使患者忍受长期慢性疼痛,随着病情的不断发展,甚至会导致关节活动度降低。因此临床应尽早制定一套正常踝关节应力分布标准,针对单个FAI个体踝关节应力分布特点,参照标准进行针对性的康复治疗,而不

应盲目地采取经验性的治疗。

1.3 踝关节旋转角度的改变 踝关节旋转角度的改变是踝关节韧带松弛的必然结果。现有的文献多集中在对静态和动态两种状态下踝关节旋转角度的研究。在这两种状态下的研究结果均提示FAI患者的踝关节内翻增加,并且增加的踝关节内翻很容易造成新的踝关节扭伤。Park等<sup>[12]</sup>对比研究了FAI患者患侧和正常侧踝关节在非负重状态下主动从完全背屈到完全跖屈时距骨的生物力学变化。结果在15个正常踝关节中,踝关节由背屈向跖屈运动时,内翻/外翻、跖屈/背屈、内旋/外旋的平均旋转运动分别为15.5°、54.1°和20.7°。在15个不稳定踝关节中平均为19.0°、56.3°和30.4°。统计结果显示在不稳定踝关节中,踝关节在无负重状态下由背屈向跖屈运动时,距骨的内旋和内翻运动明显增加。Li等<sup>[18]</sup>记录了2名女性垂直跳在25°倾斜平板上的3D运动学、动力学和肌肉活动度。1名参与者的患侧试验显示,与她的正常侧试验相比,在落地前阶段和最初接触时,脚踝内翻和内旋角都有所增加。另一名参与者的患侧试验显示,与她的正常侧试验相比,在落地前阶段,髌关节外展角度更大,腓骨长肌激活延迟。以上研究结果显示,无论是在踝关节非负重状态下、负重状态下还是跳跃过程中,踝关节均存在一定程度的内翻增加。郑绍敏等<sup>[19]</sup>用等速肌力法评估FAI患者健侧和患侧踝关节在不同角速度下的背伸/跖屈值和外翻/内翻值,结果显示,FAI患者患侧踝关节在角速度60°/s和120°/s下的背伸/跖屈值和外翻/内翻值均小于健侧。这一结果表明,FAI患者存在跖屈和内翻增加或背伸和外翻减小的情况。Osama-Ragaa Abdelraouf等<sup>[20]</sup>使用三维运动分析系统分别在10%和30%步态周期收集穿鞋和光脚行走状态下FAI患者踝关节矢状面和冠状面的运动学参数,结果显示,穿鞋较光脚行走会增加踝关节跖屈及内翻角度。此项研究结果可以在一定程度上说明FAI患者在穿鞋较光脚行走状态下更容易再次发生踝关节扭伤,同时在进行踝关节生物力学研究时,应考虑穿鞋因素,以免影响研究结果。

## 2 FAI患者的踝关节生物力学评估方法

在研究工作中获得生物力学数据的方法是研究踝关节生物力学的重要手段。现阶段的研究方法包括微型探头、运动分析系统、视频记录、足底压力鞋及激光等。这些方法可以从不同角度准确地评估踝关节生物力学的改变,为临床诊疗提供客观依据。Takeuchi等<sup>[11]</sup>运用微型韧带性能探头对6具新鲜冷冻下肢标本进行研究,将踝关节从背屈15°手动移至跖屈30°,

以微型测力探头在韧带每个端点检测距腓前韧带的应变。结果显示在距腓前韧带的弹性范围内,拉力与应变成正比。这一结果与之前的系统测定的结果相似。因此,该系统可用于有效地确定肢体位置与踝关节韧带应变模式之间的关系。Lee等<sup>[21]</sup>利用运动分析系统采集了FAI患者在步态周期过程中踝关节的生物力学数据,并与踝关节外侧扭伤患者及正常组作对比,结果表明FAI患者表现出了更严重的踝关节背屈减小及内翻增大。这一研究结果与既往研究保持了高度一致性,因此运动分析系统适用于评估踝关节不稳定的严重程度并指导临床医生制定针对性的康复方案。Donovan等<sup>[22]</sup>结合阶梯试验和三维运动捕捉系统检测不同功能活动间踝关节生物力学的差异。结果显示,FAI患者在行走、下台阶和跳跃落地过程中通过三维运动分析测量到的踝关节内翻明显更多。因此用摄像机分析FAI患者不同运动方式是一种基于生物力学证据的踝关节评估工具。Donovan等<sup>[23]</sup>使参与者穿上足底压力鞋垫,并将激光二极管固定在受累肢体的背部,记录30s内FAI患者在正常、舒适步行速度下的足底压力,并捕捉墙上激光输出的视频记录。结果显示行走过程中激光的峰值旋转可以解释57%的中足外侧和64%的前足外侧的变异。因此交叉线激光可能是预测FAI患者步行时足底侧压的一种有价值的临床工具。陆沈吉等<sup>[24]</sup>使用上海交通大学电子信息与电气工程学院研发的足底压力动态检测装置评估FAI患者足底压力中心的分布情况,结果表明该设备有助于制定个性化康复治疗及随访,提高康复治疗的趣味性及患者依从性。

磁共振常被用来描述踝关节周围软组织的损伤情况,如韧带有无撕裂、关节腔有无积液及关节软骨损伤情况等。而最新的研究表明,磁共振可以通过测定关节软骨中蛋白多糖的含量描述踝关节的生物力学特征<sup>[25]</sup>。Song K等<sup>[26]</sup>的研究证实,T1 $\rho$ 弛豫是踝关节不稳诱导的早期软骨退变的敏感性标志物。Wikstrom等<sup>[27]</sup>运用相关性分析研究了15例踝关节不稳患者距骨软骨和距下关节软骨T1 $\rho$ 弛豫时间与常见步态生物力学之间的关系,结果显示,步态越大,距骨软骨T1 $\rho$ 弛豫时间越长,即关节软骨中蛋白多糖含量越低。因此磁共振可以一定程度上用来评估FAI患者的踝关节生物力学特征。

FAI的生物力学评估方法多种多样,且技术较成熟,临床应多种方法结合使用。笔者认为对于FAI患者踝关节生物力学的评估应包括非负重和负重两种状态,评估内容应包括韧带应力、关节软骨应力、关节活动度及足底压力分布情况,同时还应注重膝及髋关节

生物力学变化,以对患者进行综合评估,制定针对性康复策略。

### 3 FAI患者的膝、髋关节生物力学改变

由于踝关节扭伤后姿势的改变,下肢力线平衡遭到破坏,会进一步引起膝关节、髋关节运动角度、力矩及周围肌力等的改变,从而使下肢力线达到“新的”平衡。这一“新平衡”会造成膝关节和髋关节生物力学改变。Lin等<sup>[28]</sup>使30名参与者进行单腿向前跳跃,然后单腿落地,采集运动学和动力学数据用于计算向前跳跃落地时髋关节和踝关节的角度、速度、力矩和肌肉活动,与未受伤的对照组相比发现,患有FAI的运动员在最初落地时髋关节屈曲和踝关节外翻角度显著增加,这表明他们倾向于使用髋关节运动和额外的踝关节外翻角度来避免落地时的踝关节内翻。Yumeng等<sup>[29]</sup>收集了2组女性参与者的下肢生物力学数据。结果显示,FAI组的膝关节屈曲角度、膝关节屈曲位移、最大伸膝力矩和内旋转力矩以及矢状面的向心运动均显著增加,这是由于患有FAI的参与者在跳跃到倾斜的地面上时,采用了一些补偿策略来改善他们的脚踝和姿势稳定性。Ziabari等<sup>[30]</sup>使用运动捕捉系统收集了FAI患者患侧和健康侧踝关节、膝关节及髋关节在步态周期中的生物力学数据,并与健康对照组比较,结果显示与健康对照组相比,FAI患者健康侧表现出更大的髋关节后伸、膝关节屈曲及踝关节背伸。陈康等<sup>[31]</sup>以峰力矩/体重衡量髋、膝关节肌群力量,以各方向到达距离/患肢长度评估动态姿势控制能力,并进行相关性分析,结果表明踝关节不稳患者存在髋屈肌、外展肌群及膝伸肌群力量及动态姿势控制缺陷。

### 4 结论

FAI是一种涉及踝关节多种功能异常的疾病,包括本体感觉、姿势控制及生物力学等,但本体感觉及姿势控制的评价方法多具有一定的主观性,这使得研究结果具有一定的偏差。生物力学研究可以直观地反应踝关节损伤后的病理改变,具有客观性、准确性的特点。本综述通过对近年FAI的生物力学研究进行分析,阐述了FAI踝关节生物力学、评估方法及对髋、膝关节的生物力学影响,以期更好地为临床诊疗提供借鉴。

### 【参考文献】

- [1] S-A Lynch, Renstrom P-A. Treatment of acute lateral ankle ligament rupture in the athlete. Conservative versus surgical treatment[J]. Sports Med, 1999, 27(1): 61-71.

- [2] A-H Alghadir, Iqbal Z-A, Iqbal A, et al. Effect of Chronic Ankle Sprain on Pain, Range of Motion, Proprioception, and Balance among Athletes[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(15): 5318-5318.
- [3] N Khalaj, Vicenzino B, Heales L-J, et al. Is chronic ankle instability associated with impaired muscle strength? Ankle, knee and hip muscle strength in individuals with chronic ankle instability: a systematic review with meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 2020, 54(14): 839-847.
- [4] A Yalfani, Raeisi Z. Bilateral symmetry of vertical time to stabilization in postural sway after double-leg landing in elite athletes with unilateral chronic ankle sprain[J]. *J Foot Ankle Res*, 2022, 15(1): 43-43.
- [5] M-A Feger, Glaviano N-R, Donovan L, et al. Current Trends in the Management of Lateral Ankle Sprain in the United States[J]. *Clin J Sport Med*, 2017, 27(2): 145-152.
- [6] C Doherty, Delahunt E, Caulfield B, et al. The incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies[J]. *Sports Med*, 2014, 44(1): 123-140.
- [7] D-M Swenson, Collins C-L, Fields S-K, et al. Epidemiology of U. S. high school sports-related ligamentous ankle injuries, 2005/06-2010/11[J]. *Clin J Sport Med*, 2013, 23(3): 190-196.
- [8] K-L Markolf, Jackson S, McAllister D-R. Force and displacement measurements of the distal fibula during simulated ankle loading tests for high ankle sprains[J]. *Foot Ankle Int*, 2012, 33(9): 779-786.
- [9] J-M Hollis, Blasier R-D, Flahiff C-M. Simulated lateral ankle ligamentous injury. Change in ankle stability[J]. *Am J Sports Med*, 1995, 23(6): 672-677.
- [10] John-E Kovalski, Heitman Robert-J, Gurchiek Larry-R, et al. Joint stability characteristics of the ankle complex after lateral ligamentous injury, part I: a laboratory comparison using arthrometric measurement. [J]. *Journal of athletic training*, 2014, 49(2): 192-197.
- [11] Y Takeuchi, Inokuchi R, Takao M, et al. Three-dimensional analysis of anterior talofibular ligament strain patterns during cadaveric ankle motion using a miniaturized ligament performance probe[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 208-208.
- [12] S-J Park, Jeong H-J, Shin H-K, et al. Rotational and Varus Instability in Chronic Lateral Ankle Instability: In Vivo 3D Biomechanical Analysis[J]. *Acta Med Okayama*, 2018, 72(6): 583-589.
- [13] H Yoshizuka, Kuraoka A. Calcaneofibular ligament may act as a tensioner of peroneal tendons as revealed by a contactless three-dimensional scan system on cadavers[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 16650.
- [14] 周莉,张丽萍,吴家宝,等. 功能性踝关节不稳患者踝部运动功能特征研究[J]. *中国康复*, 2021, 36(6): 356-359.
- [15] C-C Herb, Grossman K, Feger M-A, et al. Lower Extremity Biomechanics During a Drop-Vertical Jump in Participants With or Without Chronic Ankle Instability[J]. *J Athl Train*, 2018, 53(4): 364-371.
- [16] G Marta, Quental C, Folgado J, et al. Contact patterns in the ankle joint after lateral ligamentous injury during internal rotation: A computational study[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2021, 235(1): 82-88.
- [17] D-M Torp, Thomas A-C, Hubbard-Turner T, et al. Biomechanical Response to External Biofeedback During Functional Tasks in Individuals With Chronic Ankle Instability[J]. *J Athl Train*, 2021, 56(3): 263-271.
- [18] Li Yumeng, Jupil Ko, Shuqi Zhang, et al. Biomechanics of ankle giving way: A case report of accidental ankle giving way during the drop landing test[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2019, 8(5): 494-502.
- [19] 郑绍敏,黄墩兵,姜财,等. 功能性踝关节不稳患者踝关节背伸/跖屈和外翻/内翻峰值力矩比值与姿势控制能力的相关性研究[J]. *中国康复*, 2021, 36(7): 392-395.
- [20] Osama-Ragaa Abdelraouf, Abdel-aziem Amr-Almaz. Ankle and foot mechanics in individuals with chronic ankle instability during shod walking and barefoot walking: A cross-sectional study[J]. *中华创伤杂志英文版*, 2021, 24(3): 174-179.
- [21] I Lee, Ha S, Chae S, et al. Altered biomechanics in individuals with chronic ankle instability compared with copers and controls during gait[J]. *J Athl Train*, 2021, 57(8): 760-770.
- [22] L Donovan, Miklovic T-M, Feger M-A. Step-Down Task Identifies Differences in Ankle Biomechanics Across Functional Activities[J]. *Int J Sports Med*, 2018, 39(11): 846-852.
- [23] L Donovan, Torp D-M, Thomas-Fenwick A-C. Using a Crossline Laser to Predict Peak Plantar Pressure During Walking[J]. *J Athl Train*, 2020, 55(7): 739-743.
- [24] 陆沈吉,吴智刚,蔡萍,等. 足底压力动态检测对慢性踝关节不稳患者的评估与临床应用[J]. *中国康复*, 2020, 35(12): 641-644.
- [25] E-A Wikstrom, Song K, Tennant J-N, et al. T1rho MRI of the talar articular cartilage is increased in those with chronic ankle instability[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2019, 27(4): 646-649.
- [26] K Song, Pietrosimone B, Tennant J-N, et al. Talar and Subtalar T1rho Relaxation Times in Limbs with and without Chronic Ankle Instability[J]. *Cartilage*, 2021, 13(1\_suppl): 1402S-1410S.
- [27] E-A Wikstrom, Song K, Tennant J-N, et al. Gait Biomechanics and Balance Associate with Talar and Subtalar T1rho Relaxation Times in Those with Chronic Ankle Instability[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2022, 54(6): 1013-1019.
- [28] J-Z Lin, Lin Y-A, Lee H-J. Are Landing Biomechanics Altered in Elite Athletes with Chronic Ankle Instability[J]. *J Sports Sci Med*, 2019, 18(4): 653-662.
- [29] Y Li, Ko J, Walker M, et al. Does Chronic Ankle Instability Influence Knee Biomechanics of Females during Inverted Surface Landings[J]. *Int J Sports Med*, 2018, 39(13): 1009-1017.
- [30] Ziabari EZ, M Razi, M Haghpanahi, et al. Does ipsilateral chronic ankle instability alter kinematics of the other joints of the lower extremities: a biomechanical study[J]. *Int Orthop*, 2020, 46(2): 241-248.
- [31] 陈康,王清亮,张也,等. 慢性踝关节不稳的髌、膝关节肌群力量及动态姿势控制的研究[J]. *中国康复*, 2022, 37(6): 363-366.