

文章编号:1004-7220(2012)01-0109-06

· 综述 ·

成人获得性可复性平足的生物力学研究进展

夏江, 杨云峰, 俞光荣
(同济大学附属同济医院 骨科, 上海 200065)

摘要: 成人获得性扁平足主要由胫后肌腱功能不全引起,是足踝外科的常见病,其中以可复性平足最为多见。如何解释其发病机制并选择恰当的手术方式治疗是目前研究的热点。随着平足体外建模技术的日臻完善,生物力学试验的准确性和可重复性逐渐得到认可,其研究成果也成为临床平足治疗的重要理论依据。本文回顾了胫后肌腱功能不全导致平足的生物力学机制,及以此为基础在尸体标本和有限元模型上建立平足模型的各种不同方法,并对平足畸形相关基础研究中不同重建方法的生物力学特性进行分析比较。作者认为,在牵拉外在肌腱模拟其动力性稳定结构的前提下,采取破坏韧带等静力性稳定装置的方式建立起的可复性平足体外模型更为可靠;针对平足模型采用的各种重建方式的生物力学特性不尽相同,软组织重建应与骨性手术联合使用,而骨性手术需根据畸形程度和特点进行个性化的选择。

关键词: 平足畸形; 体外建模; 有限元分析; 重建; 生物力学

中图分类号: R 682.16 **文献标志码:** A

Advances in biomechanical studies of flexible adult-acquired flatfoot deformity

XIA Jiang, YANG Yun-feng, YU Guang-rong (Department of Orthopedics, Tongji Hospital of Tongji University, Shanghai 200065, China)

Abstract: Adult-acquired flatfoot deformity (AAFD), which is mainly caused by posterior tibial tendon dysfunction (PTTD), is a common foot and ankle disease, and most of the deformities are flexible. How to explain the pathogenesis of AAFD and choose proper surgical treatment for the deformity has become a hot research focus nowadays. With the development of *in vitro* modeling technique for flatfoot, the accuracy and repeatability of the biomechanical tests have been gradually recognized, and the research results have also provided important theoretical basis for the clinical treatment of flatfoot deformity. In this article, the biomechanical mechanism of AAFD caused by PTTD, and the various modeling methods of flatfoot based on cadaver or finite element model were reviewed. The biomechanical characteristics of different reconstruction procedures in relative basic researches on flatfoot deformity were also analyzed and compared. The author believes that on the basis of simulating the dynamic stability of foot by tendon loading, the *in vitro* model of flexible flatfoot established by selective ligaments section is more reliable, and the reconstruction procedure adopted by various flatfoot models has different biomechanical characteristics. The soft tissue reconstruction and the bony procedures should be performed at the same time, and individual bony procedures should be chosen based on the degree and feature of the deformity.

Key words: Flatfoot deformity; *In vitro* modeling; Finite element analysis; Reconstruction; Biomechanics

收稿日期:2011-03-29; 修回日期:2011-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30801163)。

通讯作者:俞光荣, Tel:021(66111097); E-mail:yuguangrong2002@yahoo.com.cn。

成人获得性平足(adult-acquired flatfoot deformity, AAFD)是足踝外科的常见病,常以内侧纵弓塌陷和后足及踝关节内侧稳定结构失衡为特征。其病因可以是多方面的,后足的骨关节炎和创伤都可最终导致平足畸形。然而临床上最常见的病因仍是胫后肌腱功能不全(posterior tibial tendon dysfunction, PTTD)。Johnson等^[1]对由PTTD引起的AAFD进行了临床分期:I期为胫后肌腱(posterior tibial tendon, PTT)滑膜炎,没有肌腱失效、畸形和功能异常;II期为柔软平足畸形,PTT撕裂伴明显功能减退;III期为僵硬的后足外翻畸形,PTT退变伴明显的中足和后足的退行性变;Myerson等^[2]补充了IV期,即距骨在踝穴内外翻倾斜,伴或不伴有三角韧带的失效。其中II期即可复性平足是临床上最为常见的,也是AAFD由柔软向僵硬畸形过度的关键时期。因此,了解可复性平足的生物力学特性,并以此为依据对此期患者给予及时恰当的治疗,对控制病情发展显得尤为重要。本文就可复性平足发病的生物力学特点、模型的建立及不同重建方法的生物力学特性等方面做一综述。

1 PTTD致平足的发病机制及其生物力学特点

胫后肌是维持足内侧纵弓的重要动力性结构,其作用主要是在步行周期的支撑相抵抗后足的外翻^[3]。而在PTTD时PTT出现功能障碍,在支撑相中期和跟离地相,无法充分内翻锁死距下关节,中足无法形成有力的支撑杠杆,小腿三头肌作用止点向近端移动至距舟关节,造成中足压力增加,最终导致中足塌陷、前足外展,即距骨周围外侧半脱位^[3]。另外,由于PTT无法对抗腓骨短肌的外翻应力,跟腱的作用力落到距下关节轴线外侧,导致后足过度外翻。小腿三头肌的逐步过度收缩会导致持续、僵硬的后足外翻,并进一步加重内、外侧的软组织不平衡,最终导致内侧纵弓的静态平衡系统失效;其中跟舟足底韧带(弹簧韧带)复合体最容易出现撕裂,三角韧带及整个内侧柱复合体也会因持续的后足外翻而承受过度的应力,并逐渐失效^[4]。所有这些改变最终会导致中足和后足各关节的退变。

上述理论经由Niki等^[5]的体外生物力学研究

得以证实。他们通过对正常足标本的指定肌腱施以不同负荷,分别模拟了跟着地期、支撑期和跟离地期3种不同步态。随后放松PTT的负荷以模拟PTTD的情形。通过分析中后足各骨的位移变化发现,距骨出现内旋和跖屈位移,跟骨出现外翻且内旋,足舟骨和骰骨则出现外翻。这些位移很小,但是差异却有统计学意义。说明在PTTD早期,内侧稳定结构仍足以维持足弓的形态,但随着长时间的负荷加载,这些微小的移位趋势最终会导致平足畸形。Imhauser等^[6]认为,胫后肌在跟离地期时对后足步态的作用最大,故他们模拟了此期的PTTD尸体模型,并对足底压力负重中心(center of pressure, COP)位置的变化进行了研究;结果显示在放松胫后肌腱的工况下,COP明显向近端和内侧移动,而这种负重部位的变化会进一步导致中后足内侧稳定结构的失效,从而导致中足塌陷和平足畸形。

在生物力学研究中,尸体标本试验只能针对步行周期的某一瞬间状态进行研究,很难完整动态模拟整个步行周期的情况;而步态分析可以分析整个步行周期足部各解剖结构的相对位移变化,可用于判断平足畸形的发病特点,并进一步预测畸形的发展趋势。Ness等^[7]对比研究了34例PTTD患者和25例正常人的步态,结果发现PTTD组的步频、步幅明显下降,站立相时间明显增长。另外,PTTD组后足背伸度数减少、外翻增加;前足跖屈减少、外展增加且在推进时相时无法内翻,这在一定程度上验证了上述PTTD所致平足畸形的理论。Levinger等^[8]通过严格控制的影像学测量设定了PTTD组和对照组,经过步态分析发现PTTD组和对照组相比,前足在矢状面和横断面、后足在横断面的位移变化有显著性差异,变化趋势和Ness等^[7]的结论相似,但Levinger等^[8]发现前足背伸的最大度数较对照组明显增大,这和前者的结果相悖。Ringleb等^[9]在步态分析的同时测试了胫后肌、腓肠肌、胫前肌和腓骨肌的肌电变化,结果显示PTTD患者胫后肌肌电活动代偿性增强;而除了其拮抗肌-腓骨肌外,腓肠肌和胫前肌也出现了活动性增强现象。其中,胫前肌的活动增强可以解释PTTD患者前足背伸增加的现象,而腓肠肌和腓骨肌的活动增强则是畸形进一步发展的源动力之一。

2 生物力学研究中可复性平足模型的建立

2.1 静力性稳定结构破坏模型

在尸体标本上模拟平足畸形是对 AAFD 进行生物力学研究的重要前提。骨和韧带是维持足纵弓重要的静力性内在维持结构,其中骨结构和关节的退变很难在尸体足上模拟,故选择性地切断松解韧带和骨结构间的软组织连接成了构建可复性平足模型的主要方法。杨云峰等^[10]选择性地切断跟舟足底韧带(弹簧韧带)、跖长韧带、跖短韧带和跖腱膜,发现随机切断足底三条韧带时,施以较小的负荷即可出现肉眼可辨的扁平足畸形,其中跖腱膜对于维持内侧纵弓的作用最为显著。Vora 等^[11]通过选择性地切断韧带获得了两种不同程度的柔软平足模型,建模精度得到进一步提高;其中,轻度畸形仅需切断弹簧韧带和距舟关节囊,而重度畸形需在上述基础上再切断跖长、跖短韧带、三角韧带浅层和距跟骨间韧带。但是,上述建模方法用于研究 PTTD 所致平足是否符合临床的真实情况仍有待商榷。Deland 等^[12]对 31 例 PTTD 患者进行了足踝部的 MRI 检查,并与对照组相比较发现,PTTD 所致平足畸形患者最易受累的韧带是弹簧韧带,其后依次是跟舟骨间韧带和三角韧带浅层,而跖腱膜和跖长、跖短韧带却并没有明显受累的表现,从而提示常用的生物力学建模方式和临床上的真实情况可能还有差距。

2.2 动力性稳定结构的模拟

除静力性内在稳定结构外,肌肉和肌腱等动力性稳定结构对于足弓的维持也很重要。而外在肌腱对于 AAFD 的生物力学研究更是尤为关键,因为不仅其发病与肌腱功能异常密切相关,在重建时也常用到肌腱转位。目前常用的方法是通过选择性牵引肌腱来模拟步态中的动力性稳定结构。一般选择牵引胫长伸肌腱、趾长伸肌腱、胫后肌腱、腓骨长肌腱、腓骨短肌腱和跟腱,然后在模拟体重进行轴向加载的情况下将 PTT 放松以模拟 PTTD。因为在支撑相和离地相,这些肌肉处于明显的活动期。Kitaoka 等^[13]发现在尸体足上牵引上述肌腱会造成中后足各关节空间位置和足弓高度的显著变化,牵引肌腱会使足弓趋向变平。但是各肌腱牵引力大小的确定方式仍有争议。多数试验采用肌肉生理横截面积(physiological cross-sectional area, PCSA)与肌电标准

化来决定施加力的大小^[14]。但在活体中,肌力的调整常通过足部各关节位置变化的反馈来进行,此时采用 PCSA 和肌电标化的方法常无法真实模拟活体的情况。Hansen 等^[15]在控制地面反作用力和跟骨位置的前提下,发现胫后肌腱和跟腱的牵引力及其比值远比传统方法计算出的结果大。但在具体试验过程中,由于尸体标本条件和仪器的限制,很难完全真实地模拟步态。鉴于此,Imhauser 等^[6]提出可以通过控制 COP 位置的方法来进行加载和牵引肌腱,这样做虽然可能无法真实地模拟步态,但是可将各外力按接近真实的比例缩小;Niki 等^[5]指出,只要轴向负荷超过标本预计体重的 25% (不超过 50% 体重),足的形态变化即与轴向负荷无关,故控制 COP 的方法更具实用性。

2.3 有限元模型的建立

近年来,有限元分析(finite element analysis, FEA)在足踝部生物力学试验中得到了较广泛的应用,虽然目前它还无法完全替代传统的尸体标本试验,但是可以作为传统生物力学试验的一个很好补充。此外,FEA 可以测量足踝内部的应力应变,这是传统尸体标本试验无法做到的^[16]。杨云峰等^[17]应用逆向工程原理,建立了包含骨、韧带、肌腱和足底软组织的足部有限元模型,通过和尸体标本试验对比,证实了两者的位移变化有相同的趋势。但有限元模型在获得性平足中的应用报道较少,这可能与软组织建模精度与真实情况差异较大有关。Cheung 等^[18]在前人研究的基础上建立了考虑软组织材料非线性弹力变化的足部有限元模型,并通过在不同病理、手术和鞋垫矫治情况下的生物力学反应验证了此模型的可靠性。这在一定程度上为今后在有限元模型上研究平足畸形提供了技术支持。

3 各种重建方法的生物力学研究

3.1 软组织重建

3.1.1 趾长屈肌腱(FDL)转位

FDL 转位是最常用的 PTT 加强术,常和骨性手术联用,用于早期柔软畸形的矫形。但是从生物力学试验结果来看,其单独应用于平足畸形的效果却不尽如人意。Niki 等^[5]在放松 PTT 的情况下破坏维持足纵弓的韧带建立了平足模型,但在平足模型上模拟 FDL 转位再次加载 PTT 后仍无法恢复后足的形态学改变。Ki-

aoka 等^[19]比较了 FDL 转位和三角韧带重建对于足纵弓的维持作用,结果证实 FDL 转位对于足纵弓的支撑效果较差。这些试验的结果明确提示,对于可复性平足而言,单独重建其动力性稳定装置无法对抗既有的静力性稳定装置的缺失。因此,临床上不可单独应用,需和其他内侧纵弓的静力性稳定重建手术或骨性手术联用。

3.1.2 弹簧韧带的重建 弹簧韧带是内侧纵弓的静力性稳定装置中最容易受累的结构,大体解剖上可将其分为两束,即内上韧带和下韧带。临床实践证实,在 PTTD 的进展过程中,单纯修复弹簧韧带很难对抗畸形的进展,因此,进行弹簧韧带的重建是更好的选择。至于重建的方法,目前最常用的是用腓骨长肌腱重建。Thordarson 等^[20]对 4 种软组织重建方法进行了生物力学比较,这些方法分别为:腓骨长肌腱从内向外穿跟骨前部固定,胫前肌腱经舟骨穿至足底后再从内向外穿跟骨前部固定,胫前肌腱直接从内向外穿跟骨前部固定,跟腱瓣穿足舟骨后再固定至跟骨,结果显示腓骨长肌腱重建法维持足纵弓的作用最强。Choi 等^[21]则比较了 3 种不同腓骨长肌腱重建弹簧韧带的方法,分别为:内上韧带重建、下韧带重建和联合重建,其中内上韧带重建法与 Thordarson 等^[20]的方法一致,结果显示 3 种重建方法均可有效的纠正距舟关节外展和距下关节的外翻,但联合重建的效果最为理想。

3.2 骨性重建

单纯的软组织手术在治疗较严重的畸形时,常因骨结构对位不良无法承受过度的负荷而失败,所以临床上常用骨性手术来保护软组织的修复或重建。治疗 PTTD 的骨性手术主要可分为两大类,一种以跟骨内移截骨(medialising calcaneal osteotomy, MCO),外侧柱延长(lateral column lengthening, LCL)和内侧柱稳定手术为基础;另一种则是中后足的关节融合。前者常与软组织手术联用,用于可复性平足的矫形,而后者则常用于僵硬畸形。下文主要讨论第一类手术的生物力学研究情况。

3.2.1 跟骨内移截骨

临床上 MCO 常与 FDL 转位术联合使用。从生物力学角度来看,MCO 有两点主要作用:首先,将跟腱的作用力内移,增加了内翻的应力,同时也保护了力量相对较弱的转位 FDL;另外,通过 MCO 将足跟

的负重轴向胫骨的长轴靠近,减少了肌腱转移后足进一步外翻的风险。Sung 等^[22]通过生物力学试验证实,MCO 术后早期提踵时,PTT 以及跟腱所需施加的应力与术前相比明显下降,从而证明了 MCO 可以提高 FDL 转位的术后疗效。而 MCO 对内侧静力性稳定结构也有保护作用,Otis 等^[23]通过测量 MCO 前后负重时标本足弹簧韧带的长度,证实 MCO 可以有效的减少弹簧韧带的张力,有助于内侧稳定结构的修复。Arangio 等^[24]通过对平足三维模型进行模拟手术,发现 MCO 可以明显的降低平足模型中明显增高的距舟关节压力和内侧柱的负荷,而辅以 FDL 转位可进一步降低距舟关节内压力,但其效果只有 MCO 的 1% 不到。当然,MCO 也存在一些问题,Hadfield 等^[25]在 14 例尸体标本上模拟了 MCO,通过模拟负重进行足底压力测试,结果发现第 1、2 跖骨区域应力明显减少,而跟骨外侧缘与前足外侧的峰压强则有所增加,提示 MCO 虽然可以显著减轻前足内侧的压力但有加重前足旋后的趋势,必要时需辅以其他术式与之平衡。

3.2.2 外侧柱延长

当 PTTD 进展到 II 期晚期时,可能出现前足外展、跖骨窦或腓骨下的撞击,此时外侧柱出现相对的短缩,因而在此期通过延长外侧柱来恢复内外侧柱间的平衡进而维持内侧纵弓的稳定是十分必要的。通过 LCL 来恢复足弓的原理尚未完全阐明,过去认为是 LCL 增加了跖腱膜的张力,再通过绞盘作用抬高足弓^[26],但 Horton 等^[27]通过的试验证实,LCL 术后跖腱膜内侧的张力反而有所下降。此外,相对可靠的解释是,由于距骨头是一个宽度大于高度的不规则球体,故当 LCL 术后足舟骨在相对距骨头内移的同时也向跖侧移动,而由于在矢状面上距骨头的曲率半径较小,因而轻度的位移会导致明显的前足跖屈和足弓抬高^[28]。

LCL 的具体手术方式主要包括跟骨远端截骨延长(Evans 手术)和跟骰关节撑开融合(calcaneocuboid distraction arthrodesis, CCDA)两种。而究竟使用何种术式更为合理是 LCL 生物力学研究的热点。Copper 等^[29]通过实验指出,Evans 手术将外侧柱延长 10 mm,跟骰关节内的峰压强较术前增加了 8 倍之多,为避免由跟骰关节的退变而引起的并发症,他建议使用 CCDA 行 LCL 更为合理。但随后

Momberger 等^[30]的生物力学实验则提出了相反的观点,经测量,正常足标本在制成平足模型后跟骰关节内的峰压强由 8.9 kg/cm² 增加到 18.5 kg/cm²;而在行 Evans 手术后此压强不但没有增加,反而下降到 15 kg/cm²,认为 Copper 等之所以得出相反的结论是因为他们并未使用平足畸形的模型。LCL 术后的另一个并发症是导致前足过度旋后,使患者出现不适。Tien 等^[31]通过生物力学实验证实了这一点,他们在两组标本上分别模拟了 Evans 手术和 CCDA,比较其术前和术后前足的压力变化;结果显示,两组标本术后前足内侧压力均显著减少,而外侧压力相应增加,但是 CCDA 组前足外侧压力的增量是 Evans 组的 2 倍;因此,CCDA 后患者出现前足不适的可能性更大。鉴于上述原因,若跟骰关节没有明显退变,多数学者仍主张使用 Evans 手术行 LCL。

3.2.3 内侧柱手术 很多可复性平足患者后期可出现前足僵硬性的旋后畸形,单纯依靠上述方式很难纠正;此时就需要辅以内侧柱稳定术,通过跖屈第 1 序列,恢复内侧纵弓的高度,纠正前足的旋前。此外,在行 LCL 后,会出现第 1 序列的抬高,而内侧柱手术有助于恢复前足的平衡。内侧纵弓的塌陷可以发生在距舟关节、舟楔关节、第 1 跖跗关节等多个部位,而针对不同部位的塌陷,内侧柱稳定术可以选择性地融合第 1 跖楔关节、舟楔关节等。目前更为流行的一种术式是 Cotton 手术,这种手术采用内侧楔骨背侧的开放截骨,不仅保留了临近关节的活动度,且较关节融合术而言,其愈合率更高^[32]。但 Cotton 手术对前足压力分布的影响还存在争议,Scott 等^[33]的生物力学研究显示,Cotton 术后虽然前足的压力分布有所改变,但前足外侧的压力并没有显著减少。而 League 等^[34]的研究结果显示,Cotton 术后前足内侧压力增加而外侧压力随之减少,与预期的效果一致。此术式的临床效果和生物力学作用还有待于进一步研究证实,但可以肯定 Cotton 手术的禁忌症是第 1 跖楔关节不稳定或骨性关节炎,此时行关节融合术(Lapidus 手术)是更好的选择。

4 结论

可复性平足是临床上最为常见的 AAFD 类型,其最常见的病因是 PTTD。通过对照 PTTD 患者与正常对照组的步态分析发现,PTTD 患者除足弓塌

陷外,其前、后足在步态中的位移变化也和正常组有显著差异;而步态肌电图显示在胫后肌代偿性活动增强的同时,腓骨肌、胫前肌和腓肠肌的活动性也出现增强,这可能是可复性平足畸形进一步发展的原因之一。建立合理的模型对平足的生物力学研究至关重要,目前尸体模型已经从早期的静力破坏模型发展到考虑肌腱牵拉影响的动力化模型,而逐步完善的足部有限元模型也为平足畸形的数字化研究开辟了新的方向。对于常用的重建术式,研究发现单纯软组织手术不能完全纠正既有的畸形。骨性手术中,MCO 可显著降低内侧纵弓稳定结构的负荷,但可能会加重前足旋后的趋势;LCL 不仅可以增加外侧柱的长度,亦可恢复足弓的高度。具体术式选择时,Evans 截骨比 CCDA 的生物力学特性更佳。内侧柱手术的生物力学结果尚存在争议,其是否可以有效降低前足外侧的异常应力还有待于进一步试验来证实。

参考文献:

- [1] Johnson KA, Strom DE. Tibialis posterior tendon dysfunction [J]. Clin Orthop Relat Res, 1989, 239: 196-206.
- [2] Myerson MS. Adult acquired flatfoot deformity: Treatment of dysfunction of the posterior tibial tendon [J]. Instr Course Lect, 1997, 46: 393-405.
- [3] Brodsky JW. Preliminary gait analysis results after posterior tibial tendon reconstruction: A prospective study [J]. Foot Ankle Int, 2004, 25(2): 96-100.
- [4] Bluman EM, Myerson MS. Stage IV posterior tibial tendon rupture [J]. Foot Ankle Clin, 2007, 12(2): 341-362.
- [5] Niki H, Ching RP, Kiser P, et al. The effect of posterior tibial tendon dysfunction on hindfoot kinematics [J]. Foot Ankle Int, 2001, 22(4): 292-300.
- [6] Imhauser CW, Siegler S, Abidi NA, et al. The effect of posterior tibialis tendon dysfunction on the plantar pressure characteristics and the kinematics of the arch and the hindfoot [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2004, 19(2): 161-169.
- [7] Ness ME, Long J, Marks R, et al. Foot and ankle kinematics in patients with posterior tibial tendon dysfunction [J]. Gait Posture, 2008, 27(2): 331-339.
- [8] Levinger P, Murley GS, Barton CJ, et al. A comparison of foot kinematics in people with normal- and flat-arched feet using the Oxford foot model [J]. Gait Posture, 2010, 32(4): 519-523.

- [9] Ringleb SI, Kavros SJ, Kotajarvi BR, *et al.* Changes in gait associated with acute stage II posterior tibial tendon dysfunction [J]. *Gait Posture*, 2007, 25(4): 555-564.
- [10] 杨云峰, 俞光荣, 周家铃, 等. 足底主要韧带损伤对足纵弓应力分布的影响[J]. *中华创伤杂志*, 2008, 24(5): 327-330.
- [11] Vora AM, Tien TR, Parks BG, *et al.* Correction of moderate and severe acquired flexible flatfoot with medializing calcaneal osteotomy and flexor digitorum longus transfer [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2006, 88(8): 1726-1734.
- [12] Deland JT, de Asla RJ, Sung IH, *et al.* Posterior tibial tendon insufficiency: Which ligaments are involved [J]. *Foot Ankle Int*, 2005, 26(6): 427-435.
- [13] Kitaoka HB, Luo ZP, An KN. Effect of the posterior tibial tendon on the arch of the foot during simulated weightbearing: Biomechanical analysis [J]. *Foot Ankle Int*, 1997, 18(1): 43-46.
- [14] Reeck J, Felten N, McCormack AP, *et al.* Support of the talus: A biomechanical investigation of the contributions of the talonavicular and talocalcaneal joints, and the superomedial calcaneonavicular ligament [J]. *Foot Ankle Int*, 1998, 19(10): 674-682.
- [15] Hansen ML, Otis JC, Kenneally SM, *et al.* A closed-loop cadaveric foot and ankle loading model [J]. *J Biomech*, 2001, 34(4): 551-555.
- [16] 张明, 张德文, 余嘉, 等. 足部三维有限元建模方法及其生物力学应用[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(4): 339-344.
Zhang M, Zhang DW, Yu J, *et al.* Human foot three-dimensional finite element of modeling and its biomechanical applications [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(4): 339-344.
- [17] 杨云峰, 俞光荣, 牛文鑫, 等. 人体足主要骨-韧带结构三维有限元模型的建立及分析[J]. *中国运动医学杂志*, 2007, 26(5): 542-546.
- [18] 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.
- [19] Kitaoka HB, Luo ZP, An KN. Reconstruction operations for acquired flatfoot: Biomechanical evaluation [J]. *Foot Ankle Int*, 1998, 19(4): 203-207.
- [20] Thordarson DB, Schmotzer H, Chon J. Reconstruction with tenodesis in an adult flatfoot model. A biomechanical evaluation of four methods [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1995, 77(10): 1557-1564.
- [21] Choi K, Lee S, Otis JC, *et al.* Anatomical reconstruction of the spring ligament using peroneus longus tendon graft [J]. *Foot Ankle Int*, 2003, 24(5): 430-436.
- [22] Sung IH, Lee S, Otis JC, *et al.* Posterior tibial tendon force requirement in early heel rise after calcaneal osteotomies [J]. *Foot Ankle Int*, 2002, 23(9): 842-849.
- [23] Otis JC, Deland JT, Kenneally S, *et al.* Medial arch strain after medial displacement calcaneal osteotomy: An in vitro study [J]. *Foot Ankle Int*, 1999, 20(4): 222-226.
- [24] Arangio GA, Salathe EP. A biomechanical analysis of posterior tibial tendon dysfunction, medial displacement calcaneal osteotomy and flexor digitorum longus transfer in adult acquired flat foot [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2009, 24(4): 385-390.
- [25] Hadfield MH, Snyder JW, Liacouras PC, *et al.* Effects of medializing calcaneal osteotomy on Achilles tendon lengthening and plantar foot pressures [J]. *Foot Ankle Int*, 2003, 24(7): 523-529.
- [26] Mosca VS. Calcaneal lengthening for valgus deformity of the hindfoot. Results in children who had severe, symptomatic flatfoot and skewfoot [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1995, 77(4): 500-512.
- [27] Horton GA, Myerson MS, Parks BG, *et al.* Effect of calcaneal osteotomy and lateral column lengthening on the plantar fascia: A biomechanical investigation [J]. *Foot Ankle Int*, 1998, 19(6): 370-373.
- [28] Gallina J, Sands AK. Lateral-sided bony procedures [J]. *Foot Ankle Clin*, 2003, 8(3): 563-567.
- [29] Cooper PS, Nowak MD, Shaer J. Calcaneocuboid joint pressures with lateral column lengthening (Evans) procedure [J]. *Foot Ankle Int*, 1997, 18(4): 199-205.
- [30] Momberger N, Morgan JM, Bachus KN, *et al.* Calcaneocuboid joint pressure after lateral column lengthening in a cadaveric planovalgus deformity model [J]. *Foot Ankle Int*, 2000, 21(9): 730-735.
- [31] Tien TR, Parks BG, Guyton GP. Plantar pressures in the forefoot after lateral column lengthening: A cadaver study comparing the Evans osteotomy and calcaneocuboid fusion [J]. *Foot Ankle Int*, 2005, 26(7): 520-525.
- [32] Tankson CJ. The Cotton osteotomy: Indications and techniques [J]. *Foot Ankle Clin*, 2007, 12(2): 309-315.
- [33] Scott AT, Hendry TM, Iaquinio JM, *et al.* Plantar pressure analysis in cadaver feet after bony procedures commonly used in the treatment of stage II posterior tibial tendon insufficiency [J]. *Foot Ankle Int*, 2007, 28(11): 1143-1153.
- [34] League AC, Parks BG, Schon LC. Radiographic and pedobarographic comparison of femoral head allograft versus block plate with dorsal opening wedge medial cuneiform osteotomy: A biomechanical study [J]. *Foot Ankle Int*, 2008, 29(9): 922-926.