

文章编号: 1004-7220(2025)01-0237-07

扁平足形成与治疗的生物力学研究进展

胡宗祥¹, 李强¹, 刘卉², 陈学灿³, 王向东¹

(1. 集美大学体育学院, 福建 厦门 361021; 2. 北京体育大学 中国运动与健康研究院, 北京 100084; 3. 福州海关技术中心, 福州 350015)

摘要: 通过检索 PubMed、Web of Science、中国知网和万方等数据库, 对近年来发表的有关扁平足在生物力学上的成因和治疗方法的相关内容进行了综述。其中, 扁平足的形成原因包括先天性因素和后天性因素, 而治疗方法主要有矫形鞋垫、物理疗法、手术治疗和运动疗法。这些方法在一定程度上能够纠正足部结构异常, 优化生物力学性能, 提高足部的稳定性和活动范围。对于未来的研究, 将利用先进的影像和仿真技术进行精确的病情评估, 新型材料和非手术疗法的应用将能够长期缓解症状, 而基因研究将推动早期诊断和个性化治疗的发展, 智能矫形器的使用将实现实时监测和动态调整, 从而为扁平足的评估、干预和治疗提供更多更有效的方法和手段。

关键词: 扁平足; 矫形鞋垫; 物理疗法; 手术治疗; 运动疗法; 生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.01.032

Progress of Biomechanical Study of Flat Foot Formation and Therapy

HU Zongxiang¹, LI Qiang¹, LIU Hui², CHEN Xuecan³, WANG Xiangdong¹

(1. Physical Education Institute of Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. China Institute of Sport and Health Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 3. Technical Center of Fuzhou Customs, Fuzhou 350015, China)

Abstract: This study reviews recent publications on the biomechanical causes and treatment of flat foot, through searching PubMed, Web of Science, CNKI, Wanfang and other databases. The reasons for the formation of flat foot include congenital factors and acquired factors, while the treatment methods mainly include orthopedic insoles, physical therapy, surgical therapy and exercise therapy. These methods, to a certain extent, can correct foot structural abnormalities, optimize biomechanical properties and improve foot stability and range of motion. For future research, the advanced imaging and simulation technology will be used for accurate assessment, the application of novel materials and non-surgical therapies will relieve long-term symptoms, genetic researches will promote the development of early diagnosis and personalized treatment, and the use of intelligent orthosis will realize real-time monitoring and dynamic adjustment, to provide more and more effective methods and means for the evaluation, intervention and treatment of flat foot.

Key words: flat foot; orthopedic insoles; physical therapy; surgical therapy; exercise therapy; biomechanics

扁平足是成年人中最常见的异常足部形态, 是以足的纵弓降低或消失为主要特征, 并会伴有后足

外翻和前足外展^[1-2]。此病症是因为先天或后天病因导致足踝部肌肉、肌腱或韧带的功能不全, 或骨骼

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-06-24

基金项目: 福建省科技计划项目(2022H6008), 福州海关科技计划项目(FK2023-06)

通信作者: 王向东, 教授, 博士生导师, E-mail: wangxiangdong@jmu.edu.cn

结构异常,无法维持正常的足部生物力学结构,导致足部生物力学的功能丧失。扁平足除了表现为久站或行走后足部疲劳感及疼痛感外,还可能由于运动连锁反应和机体代偿机制引发身体其他部位的疼痛或不适,如胫骨内侧应力综合征^[3]、膝盖痛^[4]、骨盆的倾斜^[5]、脊柱的前凸和腰部疼痛等^[6-7]。

本文检索了PubMed、Web of Science、中国知网和万方数据库近些年发表的相关研究性论文。中文检索式:扁平足 AND(肥胖 OR 足部损伤 OR 中足骨关节炎 OR 鞋垫 OR 鞋垫 OR 手术疗法 OR 运动疗法 OR 遗传 OR 物理治疗),英文检索式:Flatfoot AND (obesity OR foot injury OR osteoarthritis of the midfoot OR shoes insole OR Surgical treatment OR exercise therapy OR genetic OR physical therapy),纳入标准:① 主题符合扁平足;② 主题符合扁平足形成与治疗的生物力学研究。排除标准:① 研究证据等级不足;② 搜索不到完整信息。通过以上标准进行文献检索,对扁平足形成与治疗的生物力学研究进展进行综述,为深入了解扁平足的发病机制及改进治疗方案提供参考。

1 扁平足形成的生物力学机制

1.1 先天性的形成机制

虽然扁平足可能与遗传有关,但其实遗传因素本身并不直接导致损伤,而是通过其他形式表现出来,具体表现为足部的生物力学特征与骨骼结构发育异常,如副舟骨过大或足舟骨结节过大,导致足弓无法正常形成。还有足跗骨间的联合,包括软骨性或纤维性的联合,会影响足弓的支撑结构,这些都会导致扁平足的发生。

大多数儿童和青少年的扁平足为先天性,并可能在成年后继续存在^[8]。先天性垂直距骨(congenital vertical talus, CVT)是一种罕见的先天性僵硬性扁平足,其发生是由于距骨和其他足部骨骼连接方式异常引起^[9]。正常情况下,从生物力学角度分析,距骨与踝骨和跟骨之间会以较平行的角度连接,但在CVT情况下,距骨与踝骨和跟骨之间会以倾向于垂直的方式连接,这种结构会导致足部在行走负重时受力不均匀,增加足部承受压力的可能性,进一步加重足底肌肉的拉伸和疲劳,导致扁平足等足部问题。对于CVT的确切病因尚不清楚,

但越来越多的病例已被证明有遗传原因。大约50%的垂直距骨病例伴有其他神经肌肉异常或已知的遗传综合征,其余50%的病例一度被认为是特发性。然而,越来越多的证据表明,许多此类病例与单基因缺陷有关^[10]。先天性的跗骨联合(tarsal coalition, TC)也是其中扁平足形成的生物力学因素之一,并且TC会导致足部运动受限和疼痛^[11]。TC在胎儿发育时期其跗骨关节就出现异常连接,导致跗骨无法像正常情况下一样自由移动,这种异常连接会限制足部的正常运动范围,影响足弓的形成和支撑功能。TC最常影响跟舟关节和距跟关节,它会改变距下关节的生物力学结构,限制内翻和外翻,并对邻近关节施加过大的压力,导致青春期生长突增期间疼痛、反复发生踝关节扭伤或导致扁平足的形成^[12]。

1.2 后天性的形成机制

后天性因素是指在个体出生后通过环境、生活方式、行为等方面所致,而非遗传基因的影响。在扁平足病理状态中,后天性因素起着至关重要的作用。不良的生活习惯和姿势会对足部的生物力学结构和功能造成不良影响,导致扁平足的发生。

1.2.1 肥胖 肥胖与扁平足之间存在着密切的关系。肥胖者由于体重较大,足部承受的负荷也相对增加,容易导致足部生物力学结构发生改变,进而影响足部的正常生理功能,增加了扁平足的发生风险^[13]。根据研究报道,肥胖青少年扁平足的比例(70%)远高于非超重组(25%)^[14]。另外,肥胖对于足部的生物力学环境也有一定影响,它与步行时低足弓姿势、足底压力增加和足内旋都密切相关^[14]。肥胖与扁平足的发生存在高度相关性,尤其是儿童和青少年群体,肥胖导致患扁平足的风险显著增加^[15-16]。肥胖也会引起全身性的代谢异常,如糖尿病、高血压,这些代谢性疾病也会影响足部的血液循环和神经传导,进一步加重足部的负担。长期超重或肥胖也会对足部关节和软组织造成额外的压力,增加扁平足的风险。

1.2.2 足部韧带损伤 足弓的支撑主要依靠足部的韧带网络,如果这些韧带受伤,尤其是在足弓区域,会导致足弓的塌陷,改变足部的生物力学结构,导致扁平足的风险增加。长期过度使用或不当运动可能导致足部韧带过度拉伸或撕裂,进而影响足

弓的形状和稳定性。其中,弹性韧带复合体(spring ligament complex, SLC)损伤是扁平足产生的一个重要原因。SLC 损伤可分为急性损伤和慢性损伤。慢性损伤最常见的原因是胫后肌腱功能障碍(posterior tibial tendon dysfunction, PTTD),导致距骨头动态稳定性下降而过度下沉,SLC 所承受的应力逐渐增加而损伤^[17],继而会成为导致获得性扁平足的原因。经郝宇等^[18]研究发现,SLC 失效后距骨内翻趋势增加 41%,足弓塌陷的程度增加 15.6%,说明 SLC 损伤会引发足弓的稳定性明显下降,导致成人获得性扁平足的发生。Kimura 等^[19]研究认为,SLC 与胫骨后腱是距舟关节和足纵向弓最重要的稳定剂。因此,SLC 损伤常常导致扁平足畸形,SLC 的健康对于人体足部至关重要。

1.2.3 足部肌腱功能障碍 足部肌腱功能障碍也是扁平足的成因之一。其中,PTTD 是一种常见且公认的疼痛和行走障碍的原因。PTTD 也是获得性扁平足的主要原因,并可能导致足部和脚踝的一些功能障碍^[20-21]。成人获得性扁平足主要因为胫后肌腱功能不全,以及足骨关节韧带损伤所致。胫后肌腱功能不全也会导致弹簧韧带常常受累,其损伤可导致足弓塌陷和前足外展;跟距骨间韧带也常受累,其损伤可导致跟骨外翻;三角韧带功能障碍可引起内踝疼痛及足踝关节畸形;腓肠肌或跟腱挛缩可加重跟骨外翻畸形^[22]。因此,足部肌腱功能障碍不仅会导致扁平足的发生,而且还会产生各种不良症状。Orr 等^[23]研究表明,成人获得性扁平足疾病通常继发于胫骨后腱功能障碍,并伴有周围骨韧带复合物的损伤。在许多情况下,成人获得性扁平足畸形的原因是胫骨后腱功能障碍伴随胫骨后肌损伤,而胫骨后肌的功能是使足内翻,保持内侧纵弓,并防止后脚外翻变形,这些功能在胫后肌腱功能障碍中丧失,从而加重了扁平足畸形。

1.2.4 中足骨性关节炎 中足骨性关节炎引起的关节炎会导致关节周围的软组织僵硬和肿胀,导致足部的生物力学机制发生变化,在行走和站立时会造成疼痛和不适。疼痛和炎症会影响承受体重的骨头和关节,改变足弓形态,使足踝部的力线发生变化,从而形成扁平足。从生物力学角度,中足作为刚性力臂把后足的力量传递到前足,依靠于正常骨性解剖结构与关节周围强大的韧带结合所提

供的强大稳定力。人体足部第 2~5 跖骨间有跖骨间韧带相连接,这是中足所有韧带结构中最强的韧带,但第 1、2 跖骨间没有跖骨间韧带连接;同时,第 2 跖跗关节承担身体的负荷最大,第 2 跖骨与楔骨的接触面积较大,活动度最小,这也是导致足部第 1、2 跖骨容易发生分离移位,形成跖跗关节骨折脱位的部分原因。第 2 跖骨只通过跖跗韧带与跗骨相连,其支持结构提供的稳定性相较于其他跖骨较弱。足部受到创伤、过多的运动、肥胖等因素都会导致第 2 跖跗关节的退行性改变,最终发生中足的骨性关节炎^[24]。当足部的关节疼痛和功能障碍引起患者改变行走方式或姿势时,会加重足部的负担,可能导致足部生物力学结构的异常改变,最终产生扁平足或加重已有的扁平足症状。

2 扁平足治疗的手段及效果

扁平足的治疗手段主要取决于症状的严重程度和患者的个人情况。对于症状表现的不严重患者,可以采取矫形鞋垫、物理疗法、运动训练等方式,帮助恢复正常的足弓高度和足踝生物力学结构,使下肢回到正确的生物力线,从而改善扁平足的症状。对于严重的扁平足患者,如果采取保守治疗无效时,可能需要考虑手术治疗,通过手术矫正足弓畸形和减轻疼痛^[25]。

2.1 矫形鞋垫

矫正鞋垫的作用原理是通过改变足部生物力学结构及特征、分散足底压力,改善人体生物力学轴线、提高关节稳定性,解决人体由于外界因素、下肢生物力学异常及代偿等引起的各关节及人体姿势异常等问题,被广泛应用于医疗康复领域以及运动损伤预防及康复领域^[26]。由于个体差异性,也会出现各种各样的足型,故定制化的矫形鞋垫无疑是最佳选择^[27]。定制的个性化矫形鞋垫提高了非手术治疗中矫形鞋垫制作的效率和精确度,疗效也会得到提高^[28]。而随着科技的创新和研究的发展,许多新型材料与制作手段被运用于矫形鞋垫中,其结构形态和材料硬度对改善扁平足足部畸形的生物力学形态有重要的康复作用^[29]。Xu 等^[30]对佩戴 3D 打印矫形鞋垫的扁平足患者进行为期 8 周的观察,并与预制型矫形鞋垫进行比较,发现两者在每天佩戴 6~8 h 情况下,都能重新分配足底压力作

用,减轻不适症状。Cherni 等^[31]通过比较发现,使用硬度较高的3D打印矫形鞋垫,可增加扁平足中足底的压力和接触面积,从而改善行走时的姿势稳定性。

通过矫形鞋垫可以显著改善扁平足患者的足底压力,减小疼痛的发生^[32]。因此,矫正鞋垫被认为是治疗或减轻扁平足症状的最佳手段之一。但需要注意的是,除矫形鞋垫外,鞋本身对于足部的影响不可忽略,尤其对老年人。白啸天等^[33]对老年人足弓形态的研究发现,足弓下降存在增龄性趋势。因此,对于老年人,矫形鞋垫的使用将会更加广泛且重要。金哲等^[34]通过3款鞋垫分析老年人步行过程中的足底相关特性,结果发现,通过在前掌和后跟部增加GLE减震垫片,可以有效减少老年人足底高压区带来的伤害,并且后跟材料厚度的相对增加,有效降低了老年人由于年龄增长导致的行走过程中足跟部高压。但在使用矫形鞋垫的过程中,需要考虑加上矫形鞋垫后的鞋厚度是否会对安全性有一定的影响。王向东等^[35]研究认为,若为达到减震缓冲效果而仅采取厚度设计,可能不利于步态稳定性。因此,在选择矫形鞋垫时,不仅要考虑患者本身,还要考虑一些外在因素,例如鞋底高度、鞋面硬度,从而更好符合患者的需求。

2.2 物理疗法

物理疗法也是扁平足的非手术治疗手段之一,包括热磁疗法、中频电疗、中医按摩等方法^[36]。其中,主要是神经肌肉的电刺激和手法按摩。神经肌肉电刺激是一种利用特定频率的电流刺激神经和肌肉的物理治疗方法。通过神经肌肉电刺激可以促进肌肉收缩和松弛,增加血液循环和代谢,有助于减轻足部肌肉痉挛和疼痛。Namsawang 等^[37]将神经肌肉电刺激与足踝运动结合应用于外展肌,结果发现,受试者的快速肌纤维被大量激活,导致最大自主等长收缩明显增加,从而改善肌肉活性,更好提升扁平足患者足部的稳定性和活动范围。扁平足的物理疗法还包括手法按摩。手法按摩是一种传统的治疗方法,具有简单、无创口治疗、不需要复杂环境等特点。Yelverton 等^[38]研究发现,通过对足底筋膜进行交叉和横向按摩,可以使瘢痕组织变得柔软,提高其灵活性,并且在减少产生疼痛代谢物的同时阻断

A型和C型神经纤维的传导,从而达到镇痛的效果。通过按摩和推拿还可以促进气血流通、疏通经络、调整气血平衡,有助于舒缓足部肌肉紧张、改善足部循环,以缓解扁平足引起的症状。

2.3 运动疗法

扁平足的运动疗法是一种常见的非手术方法,通过特定的运动和矫形练习来改善足部的生物力学结构和功能,进一步减轻症状。运动疗法也常用于柔韧性扁平足中。基于足弓动态稳定结构的特点,针对柔韧性扁平足成年人的运动疗法越来越受到临床工作者的推荐。康复治疗师和运动康复师常常建议进行足部内外肌力量和柔韧性训练,以及髌、膝周围肌群的力量和柔韧性训练,同时还包括神经肌肉控制训练等方法^[39-41]。Kim 等^[42]通过5周的对比实验干预发现,缩足运动对于柔韧性扁平足患者内侧纵弓的改善效果和动态平衡能力的增高比足弓支撑鞋垫更为有效。研究认为,足外在肌,尤其是胫骨后肌在内侧纵弓的维持上有着关键作用^[43]。Lee 等^[44]进行为期6周的运动训练后发现,结合了胫骨后肌和足内在肌的强化训练,相较于仅进行足内在肌训练,能更好改善柔韧性扁平足患者的足底压力分布和动态平衡能力。而对应的髌、膝周围肌群的训练对足部形态也有一定影响。Turgut 等^[45]研究发现,连续3d髌关节的神经肌肉训练方法可以显著改善足舟骨下降幅度。对于足部的运动疗法,如短足+足趾伸展训练,也均可改善扁平足患者拇外展肌横截面积和足形态^[46]。此外,还有许多新型运动疗法可助扁平足患者康复,如虚拟现实^[47]。

2.4 手术治疗

扁平足是一种常见的足部疾病,其主要特征为足弓塌陷、后足外翻和距下关节过度外翻引起的前足外展。当患者出现严重的足部内侧疼痛、足部生物力学的功能丧失、步态发生改变、距下关节活动受限或足部畸形进行性加重时,应采用手术治疗^[48-49]。先天性扁平足一般均为骨性结构发育畸形而造成的僵硬性扁平足,它的生物力学结构发生严重变化,故需要手术治疗。例如,跗骨联合畸形患者可采取跟距骨桥切术、跟舟骨桥切术、跟距关节固定术、跟舟关节固定术以及三关节固定术;副舟骨畸形患者可采取副舟骨(或和舟骨结节)切除

合并胫骨后肌腱重建术;先天性垂直骨患者可采取单纯切开复位术或切开复位以及舟状骨切除术^[50]。这些手术方法都可以改变足部的生物力学结构,从而更好改善足踝部位的生理功能。张宇等^[51]研究表明,采用骨与软组织联合手术,即腓肠肌松解术、跟骨内移截骨、副舟骨切除胫后肌腱止点重建术,

治疗伴有痛性副舟骨的柔软性平足症的患者能够明显缓解足部疼痛,改善足部外观,提高患者足部功能,手术疗效确切。由此说明,手术治疗的确可以重塑足部的生物力学结构,有效解决扁平足症状。

表1总结了扁平足治疗方法及特点分类。

表1 扁平足治疗方法及特点分类

Tab.1 Flatfoot treatment methods and characteristic classification

治疗方法	类型	特点
矫形鞋垫	传统矫形鞋垫	纠正脚部问题,提供脚部支持,减轻疼痛,改善行走舒适度
	定制化矫形鞋垫	能够针对个人脚部问题量身定制,通过补充脚弓部的弹性不足、增强足部的支撑等手段,有效改善脚部健康状况
	3D打印矫形鞋垫	通过精确制造和轻量化材料,能够提供精准的脚步支撑和舒适度
物理疗法	神经肌肉电刺激	促进肌肉收缩和松弛,增加血液循环和代谢,有助于减轻足部肌肉痉挛和疼痛
	手法按摩	简单、无创口治疗,可舒缓足部肌肉紧张、改善足部循环,缓解扁平足引起的症状
运动疗法	足部内外肌力量训练	对扁平足患者内侧纵弓的改善的和动态平衡能力的增高
	髋、膝周围肌群的训练	全身性运动,通过增强下肢稳定性来改善足部姿势和步态
	虚拟现实训练	提供沉浸式体验、个性化训练、安全性和可控性以及实时反馈,有助于用户进行有效的足部矫形训练
手术治疗	骨关节固定术	通过截骨、关节融合、植入物安装等对足部进行矫正
	骨关节切除术	去除部分或全部的足部关节以改变力线并减轻疼痛
	骨与软组织联合手术	骨与软组织联合手术保留了关节,通过矫正骨骼和修复软组织来改善足部功能

3 总结与展望

近年来,国内外在扁平足研究方面取得了显著进展。本文综述了扁平足的生物力学形成机制及其治疗手段,揭示了其成因的复杂性和治疗方法的多样性。扁平足的形成机制可分为先天性和后天性两类。先天性扁平足主要与遗传因素相关,其中涉及足弓发育的关键基因和信号通路。未来的研究应深入探索其细胞和分子病理机制,揭示相关的分子基础,为靶向治疗提供理论依据,而后天性扁平足则与肥胖、损伤、炎症等因素密切相关。通过长期数据收集和智能动态监测,可及早发现问题并实施干预,防止扁平足进一步发展。在治疗方面,精准评估和个性化治疗是关键,可以借助3D足部扫描和动态步态分析等先进技术,准确评估足部生物力学异常,为优化治疗手段提供数据支持。通过生物力学建模和仿真研究,可以发现不同因素对足部生物力学结构和功能的影响,从而进行更好干预,如矫形鞋垫的设计和物理治疗方案。在运动疗法方面,应该提升扁平足患者足部内侧纵弓的稳定

性和足底压力分布,同时通过神经肌肉控制训练增强足部动态稳定性,并引入虚拟现实等新型疗法,制定个性化的康复计划以达到最佳效果。在通过手术治疗扁平足时,建议采用个性化的手术方案,根据患者的具体解剖和功能需求选择最佳矫正技术,并在术后结合科学的康复训练,确保足部生物力学结构和功能的全面恢复。综上所述,探索如何通过针对性的干预措施来预防和减轻扁平足的影响,以及研究扁平足与众多潜在因素之间的关联,都是需要深入研究的课题。对于扁平足的成因和治疗方法,可以对二者开展共同研究和探讨,从生物力学角度出发,分析二者之间的关联,为制定更精准的个性化治疗方案奠定更坚实的基础。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:胡宗祥、李强负责文献检索、整理和撰写论文;刘卉、陈学灿、王向东负责文献整理和修改。

参考文献:

- [1] WAGNER E, WAGNER P. Current concepts in treatment of ligament incompetence in the acquired flatfoot[J]. Foot

- Ankle Clin, 2021, 26(2): 373-389.
- [2] 张建中, 曲峰, 张明珠. 进行性塌陷足畸形专家共识解读 [J]. 中华医学杂志, 2023, 103(37): 2907-2911.
- [3] WINKELMANN Z, ANDERSON D, GAMES K, *et al.* Risk factors for medial tibial stress syndrome in active individuals: An evidence-based review [J]. J Athl Train, 2016, 51(12): 1049-1052.
- [4] HERCHENRÖDER M, WILFLING D, STEINHÄUSER J. Evidence for foot orthoses for adults with flatfoot: A systematic review [J]. J Foot Ankle Res, 2021, 14(1): 57.
- [5] KHAMIS A, YIZHAR A. Effect of feet hyperpronation on pelvic alignment in a standing position [J]. Gait Posture, 2007, 25(1): 127-134.
- [6] ELATAAR F, ABDELMAJEED S, ABDELLATIF N, *et al.* Core muscles' endurance in flexible flatfeet: A cross-sectional study [J]. J Musculoskelet Neuronal Interact, 2020, 20(3): 404-410.
- [7] MENZ H, DUFOUR A, RISKOWSKI J, *et al.* Foot posture, foot function and low back pain: The Framingham foot study [J]. Rheumatology (Oxford), 2013, 52(12): 2275-2282.
- [8] HUANG Z, LI Y, JIN L, *et al.* Evaluating flatfoot based on gait plantar pressure data in juveniles by a neural network method [J]. Footwear Sci, 2019, 11(S1): 157-158.
- [9] CUMMINGS JL, RIVERA AE, TIPPABHATLA A., *et al.* Comparison of different surgical techniques in correction of congenital vertical talus deformity: A systematic review and meta-analysis of the literature [J]. J Pediatr Orthop, 2023, 43(5): 317-325.
- [10] ALAEE F, BOEHM S, DOBBS MB. A new approach to the treatment of congenital vertical talus [J]. J Child Orthop, 2007, 1(3): 165-174.
- [11] VAN DER BRUGGEN W, DE GEUS-OEI LF, BOSMANS B, *et al.* Review of the role of bone-SPECT/CT in tarsal coalitions [J]. Nucl Med Commun, 2023, 44(2): 115-130.
- [12] CATANZANO AA JR, AKOH CC, EASLEY ME, *et al.* Decision-making and management of tarsal coalition in the young adult patient: A critical analysis review [J]. JBJS Rev, 2023, 11(6): 2300021.
- [13] PARK SY, PARK DJ. Comparison of foot structure, function, plantar pressure and balance ability according to the body mass index of young adults [J]. Osong Public Health Res Perspect, 2019, 10(2): 102-107.
- [14] YAN S, LI R, SHI B, *et al.* Mixed factors affecting plantar pressures and center of pressure in obese children: Obesity and flatfoot [J]. Gait Posture, 2020(80): 7-13.
- [15] POURGHASEM M, KAMALI N, FARSI M, SOLTANPOUR N. Prevalence of flatfoot among school students and its relationship with BMI [J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2016, 50(5): 554-557.
- [16] PABLO MG, DAMIAN MA, ESTHER UG, *et al.* The impact of childhood obesity on joint alignment: A systematic review and meta-analysis [J]. Phys Ther, 2021, 101(7): 1-13.
- [17] 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, 2004, 19(2): 161-169.
- [18] 郝宇. 弹簧韧带复合体损伤模型及足弓静态稳定系统的有限元分析 [D]. 太原: 山西医科大学, 2022.
- [19] KIMURA Y, YAMASHIRO T, SAITO Y, *et al.* MRI findings of spring ligament injury: Association with surgical findings and flatfoot deformity [J]. Acta Radiol Open, 2020, 9(12): 2058460120980145.
- [20] YAO K, YANG TX, YEW WP. Posterior tibialis tendon dysfunction: overview of evaluation and management [J]. Orthopedics, 2015, 38(6): 385-391.
- [21] FLORES DV, MEJÍA GÓMEZ C, FERNÁNDEZ HERNANDO M, *et al.* Adult acquired flatfoot deformity: Anatomy, biomechanics, staging, and imaging findings [J]. Radiographics, 2019, 39(5): 1437-1460.
- [22] 李晓东, 江汉, 江毅, 等. 成人获得性扁平足的手术治疗进展 [J]. 实用骨科杂志, 2015, 21(7): 626-630.
- [23] ORR JD, NUNLEY JA 2nd. Isolated spring ligament failure as a cause of adult-acquired flatfoot deformity [J]. Foot Ankle Int, 2013, 34(6): 818-823.
- [24] 康立世, 杨朝晖. 成人获得性平足症的相关研究及进展 [J]. 中华解剖与临床杂志, 2017, 22(6): 528-531.
- [25] 陈城, 施忠民. 距下关节植入物手术在平足症的争议 [J]. 中国骨伤, 2022, 35(12): 1166-1169.
- [26] 张新语, 邢新阳, 霍洪峰. 矫正鞋垫的设计原理与生物力学功能 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(23): 3744-3750.
- [27] YURT Y, ENER G, YAKUT Y. The effect of different foot orthoses on pain and health related quality of life in painful flexible flat foot: A randomized controlled trial [J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2019, 55(1): 95-102.
- [28] 苏宏伦, 郭俊超, 莫中军, 等. 个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究 [J]. 医用生物力学, 2016, 31(6): 490-494.
- SU HL, GUO JC, MO ZJ, *et al.* Biomechanical study on the personalized orthopedic insoles for flatfoot [J]. J Med Biomech, 2016, 31(6): 490-494.
- [29] WAGNER E, WAGNER P. Current concepts in treatment of ligament incompetence in the acquired flatfoot [J]. Foot Ankle Clin, 2021, 26(2): 373-389.
- [30] XU R, WANG Z, REN Z, *et al.* Comparative study of the effects of customized 3d printed insole and prefabricated

- insole on plantar pressure and comfort in patients with symptomatic flatfoot [J]. *Med Sci Monit*, 2019(5): 3510-3519.
- [31] CHERNI Y, DESMYTTERE G, HAJIZADEH M, *et al.* Effect of 3D printed foot orthoses stiffness on muscle activity and plantar pressures in individuals with flexible flatfeet: A statistical non-parametric mapping study [J]. *Clin Biomech*, 2022(92): 105553.
- [32] ZHAI JN, QIU YS, WANG J. Effects of orthotic insoles on adults with flexible flatfoot under different walking conditions [J]. *J Phys Ther Sci*, 2016, 28(11): 3078-3083.
- [33] 白啸天, 霍洪峰. 足弓差异对动静态足踝功能的影响[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(6): 951-956.
BAI XT, HUO HF. The influence of arch difference on dynamic and static foot-ankle function [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(6): 951-956.
- [34] 金哲, 冯通, 王向东, 等. 不同矫形鞋垫对老年人足底的生物力学影响[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 868-873.
JIN Z, FENG T, WANG XD, *et al.* Biomechanical effects of different orthopedic insoles on foot soles in older adults [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 868-873.
- [35] 王向东, 曹克准, 张田, 等. 老年鞋舒适性和安全性的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(6): 1120-1126.
WANG XD, CAO KZ, ZHANG T, *et al.* Biomechanical study on footwear comfort and safety for the elderly [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(6): 1120-1126.
- [36] 翟俊娜, 邵丽娜. 扁平足康复治疗的研究进展[J]. *按摩与康复医学*, 2022, 13(12): 52-54.
- [37] NAMSAWANG J, EUNGPINICHPONG W, VICHIANISIRI R, *et al.* Effects of the Short Foot Exercise With Neuromuscular Electrical Stimulation on Navicular Height in Flexible Flatfoot in Thailand: A Randomized Controlled Trial [J]. *J Prev Med Public Health*, 2019, 52(4): 250-257.
- [38] YELVERTON C, RAMA S, ZIPFEL B. Manual therapy interventions in the treatment of plantar fasciitis: A comparison of three approaches [J]. *Health SA*, 2019(24): 1244.
- [39] UTAHACHANT N, SAKULSRIPRASERT P, SINSURIN K, *et al.* Effects of short foot exercise combined with lower extremity training on dynamic foot function in individuals with flexible flatfoot: A randomized controlled trial [J]. *Gait Posture*, 2023(104): 109-115.
- [40] ENGGANANUWAT P, KANLAYANAPHOTPORO R. Gluteus medius muscle strengthening exercise effects on medial longitudinal arch height in individuals with flexible flatfoot: A randomized controlled trial [J]. *J Exerc Rehabil*, 2023, 19(1): 57-63.
- [41] PARK DJ, LEE KS, PARK SY. Effects of two foot-ankle interventions on foot structure, function, and balance ability in obese people with pes planus [J]. *Healthcare (Basel)*, 2021, 9(6): 667.
- [42] KIM EK, KIM JS. The effects of short foot exercises and arch support insoles on improvement in the medial longitudinal arch and dynamic balance of flexible flatfoot patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2016, 28(11): 3136-3139.
- [43] OKAMURA K, FUKUDA K, OKI S, *et al.* Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening exercise on static and dynamic foot kinematics: A pilot randomized controlled single-blind trial in individuals with pes planus [J]. *Gait Posture*, 2020(75): 40-45.
- [44] LEE D, CHOI JD. The Effects of foot intrinsic muscle and tibialis posterior strengthening exercise on plantar pressure and dynamic balance in adults flexible pes planus [J]. *Clin Biomech*, 2016, 23(4): 27-37.
- [45] TURGUT E, YAGCI G, BAYRAKCI TUNAY V. Hip-focused neuromuscular exercise provides immediate benefits in foot pronation and dynamic balance: A sham-controlled cross-over study [J]. *J Sport Rehabil*, 2021, 30(7): 1088-1093.
- [46] 余中起, 王超, 贺刚, 等. 三种足内在肌训练对扁平足患者拇外展肌横截面积和足形态的效果[J]. *中国康复理论与实践*, 2023, 29(8): 961-966.
- [47] YILDIRIM AHAN T, AYDOĞAN ARSLAN S, DEMIRCI C, *et al.* Comparison of short-term effects of virtual reality and short foot exercises in pes planus [J]. *Foot*, 2021(47): 101778.
- [48] VULCANO E, MACCARIO C, MYERSON MS. How to approach the pediatric flatfoot [J]. *World J Orthop*, 2016, 7(1): 1-7.
- [49] BERNASCONI A, LINTZ F, SADILE F. The role of arthroereisis of the subtalar joint for flatfoot in children and adults [J]. *EFORT Open Rev*, 2017, 2(11): 438-446.
- [50] MCKIE J, RADOMISLI T. Congenital vertical talus: A review [J]. *Clin Podiatr Med Surg*, 2010, 27(1): 145-156.
- [51] 张宇, 张挥武, 李平, 等. 骨与软组织联合手术治疗伴有痛性副舟骨的柔软性平足症[J]. *中国骨伤*, 2019, 32(1): 77-81.