

基于肌肉力学及肌电活动特征评估 专用防护鞋及鞋垫治疗副舟骨 综合征的有效性

程自申¹, 康强军^{1*}, 王占星², 饶辉³, 崔栋清¹, 王帝华¹, 金瑞娜¹, 任维娜¹

(1. 中国人民解放军联勤保障部队第九八〇医院骨三科, 河北 石家庄 050084; 2. 中国皮革制鞋研究院有限公司科技研发中心, 北京 100015; 3. 科德曼(石家庄)科技有限公司, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 副舟骨疼痛综合征是部分副舟骨患者的常见慢性病。采用专业鞋具及鞋垫干预是其有效解决途径之一。本研究分析了穿鞋前后疼痛评分、中足功能评分、胫骨后肌肌张力及行走小腿肌电特征, 发现使用副舟骨综合征防护鞋及鞋垫 12 个月后总体有效率为 71.43%、疼痛 VAS (Visual Analog Scale) 评分由 (5.23 ± 1.21) 分降为 (3.12 ± 1.33) 分, 中足功能评分由 (72.23 ± 5.62) 分升高到 (85.36 ± 1.33) 分, 胫骨后肌肌张力由 (24.24 ± 1.65) Hz 降为 (18.67 ± 2.12) Hz, 胫骨前肌标准化 RMS (Root Mean Square) 相对值由 1.25 ± 0.35 降为 0.95 ± 0.21 , 腓肠肌外侧头标准化 RMS 相对值由 0.94 ± 0.34 升为 1.38 ± 0.35 。副舟骨综合征防护鞋及鞋垫对提升有效率、降低疼痛程度、提升中足功能、降低胫骨后肌肌张力及胫骨前肌标准化 RMS 相对值、提高腓肠肌外侧头标准化 RMS 相对值有显著作用。

关 键 词: 副舟骨综合征; 防护鞋; 防护鞋垫

中图分类号 TS 94 文献标志码 A DOI: 10.13536/j.cnki.issn1001-6813.2025-012-001

Evaluation of the Effectiveness of Specialized Protective Shoes and Insoles for Treating Accessory Navicular Syndrome Based on Muscle Mechanics and Electromyographic Activity Characteristics

CHENG Zishen¹, KANG Qiangjun^{1*}, WANG Zhanxing², RAO Hui³,

CUI Dongqing¹, WANG Dihua¹, JIN Ruina¹, REN Weina¹

(1. The Third Department of Orthopedics, 980 Hospital of the Logistics Support Force of the Chinese People's Liberation Army, Shijiazhuang 050084, China; 2. Science and Technology Research Center, China Leather & Footwear Research Institute Co., Ltd., Beijing 100015, China; 3. Cordewener(Shijiazhuang) Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Accessory Navicular Syndrome is a common chronic condition among some patients with accessory navic-

收稿日期: 2025-06-11; 修订日期: 2025-07-17

基金项目: 军队后勤基金项目“青年士兵副舟骨疼痛综合征的流行病学调查及防治研究”(CLB19J044)

第一作者简介: 程自申(1980), 男, 博士, 副主任医师, 258029408@qq.com。

*通信作者: 康强军(1970), 男, 硕士, 主任医师, 2362351656@qq.com, 主要研究脊柱退变性疾病及疼痛性副舟骨的防治。

ular. The use of specialized footwear and insoles is one of the effective solutions for intervention. This study analyzed pain scores before and after wearing the footwear, midfoot function scores, posterior tibialis muscle tone, and walking calf muscle electromyography characteristics. The results indicate that, after 12 months of using the protective shoes and insoles accessory navicular syndrome (ANS), the overall effective rate is 71.43%, Visual Analog Scale (VAS) score decreased from 5.23 ± 1.21 to 3.12 ± 1.33 , midfoot function scores increased from 72.23 ± 5.62 to 85.36 ± 1.33 , and posterior tibialis muscle tone decreased from (24.24 ± 1.65) Hz to (18.67 ± 2.12) Hz. The standardized root mean square (RMS) relative value of the tibialis anterior muscle reduced from 1.25 ± 0.35 to 0.95 ± 0.21 , while the standardized RMS relative of the lateral head of the gastrocnemius increased from 0.94 ± 0.34 to 1.38 ± 0.35 . The specialized footwear and insoles have a significant effect on improving the effective rate, reducing pain levels, enhancing midfoot function, lowering posterior tibialis muscle tone and the standardized RMS relative value of the tibialis anterior muscle, as well as increasing the standardized RMS relative value of the lateral head of the gastrocnemius.

Key words: accessory navicular syndrome (ANS); protective shoes; protective insoles

引言

副舟骨综合征^[1]是一种常见的足部疾病,主要表现为足内侧疼痛。副舟骨是足部常见的额外骨骼^[2],存在于4%~20%的人群中。尤其在青年士兵中越来越普遍,他们长期的高负荷运动致副舟骨承受的压力增大,从而增加该病的发病率。虽然多数副舟骨无症状,但当受到外伤、鞋子摩擦或过度牵拉时,副舟骨与足舟骨连接处可能发炎,导致疼痛和肿胀^[3],尤其在Ⅱ型副舟骨中^[4]。目前,对于副舟骨综合征的治疗除了手术治疗外^[5],还是以保守治疗为主^[6],主要包括休息、冰敷、非甾体抗炎药治疗^[7]、活动限制、石膏固定等^[8],但治疗时间长,易复发。

近年来,副舟骨综合征防护鞋及鞋垫作为一种新兴的保守治疗-辅具或鞋具,逐渐引起临床关注。研究表明,这种专门设计的鞋具能够有效缓解副舟骨平足患者行走疼痛、提升足弓高度并有效分解内侧纵弓的压力分布^[9],但现有的研究缺乏对非平足副舟骨综合征患者穿戴副舟骨综合征防护鞋及鞋垫有效性的数据。

本研究通过对穿戴副舟骨综合征防护鞋及鞋垫患者治疗前后的总体疗效、VAS评分、AOFAS (American Orthopaedic Foot and Ankle Association) 中足评分、胫骨后肌张力、末次随访行走时小腿部分肌肉的RMS进行测定,结果较传统治疗显示出一定的优势,这为副舟骨疼痛综合征的保守治疗提供了一种新的思路与方法,为患者的恢复带来了新的希望。

1 临床数据

1.1 一般信息与分组

基于功效分析(软件为GPower 3.1.9.7;效应大小 $d = 0.8$, $\alpha = 0.05$,功效 $= 0.9$),将2022年2月1日至2023年5月1日选择在我院治疗的诊断为疼痛性足副舟骨综合征的70例现役士兵,随机分为观察组和对照组,每组人数为35人,均为男性,详细信息如下:观察组年龄18~22岁((19.25 ± 2.23) 岁),病程3~10个月((9.24 ± 8.43) 个月),左足20例,右足15例;对照组年龄19~23岁((19.32 ± 1.12) 岁),病程4~9个月((8.41 ± 7.65) 个月),左足18例,右足17例。两组年龄($t = 1.32$, $P = 0.19$)、病程($t = 0.87$, $P = 0.39$)及足部受累侧别($\chi^2 = 0.25$, $P = 0.62$)均无统计学差异。

1.2 诊断、纳入与排除及剔除标准

1.2.1 诊断标准

(1) 患者足内侧有压痛、肿胀和畸形^[1],长时间负重行走或活动后症状加重。(2) 影像学:X线片可用于确认副舟骨的存在并评估其类型^[10],MRI评估骨髓水肿、软骨连接及胫骨后肌腱情况^[11]。

1.2.2 纳入标准

(1) 符合副舟骨综合征的诊断标准。(2) 同意参与本研究,并愿意接受后续的随访和复诊。(3) 在研究期间,遵循规定坚持穿戴定制的副舟骨疼痛综合征防护鞋及配套的鞋垫,签署知情同意书。

1.2.3 治疗组排除及剔除标准

排除标准:(1)不符合副舟骨综合征的诊断及诊断为扁平足的个体。(2)曾接受副舟骨相关手术、有严重的足部外伤史或其他原因引起的足内侧疼痛。(3)有其他严重的基础疾病或不能完成试验的个体。剔除标准:(1)在研究过程中中断的个体。(2)采用其他治疗手段,出现无法评估的数据。(3)不能接受随访和复诊的个体。(4)经研究者综合评估不适合继续参与的个体。

1.3 治疗方法

将观察组和对照组分别采用两种不同的鞋进行治疗。观察组采用适配定制的副舟骨疼痛综合征防护鞋及鞋垫,其根据足底压力分布,1:1量脚定制。核心设计理念体现在鞋垫的构造和鞋底的设计上,具体包括足弓承托设计、副舟骨缓冲压力设计及鞋底内足弓处的升高设计。通过适度抬高内足弓并结合缓冲设计,可以有效缓解副舟骨处应力的集中,从而降低出现褥疮的风险。足弓作为足部的关键结构,承载着走路和跑步时的重力,提供了必要的稳定性与灵活性(专利号分别为ZL202122962689.4、ZL202221258714.9)。

对照组患者使用自备的普通鞋和鞋垫,这些鞋垫不具备矫正功能。观察组的穿着时间每天不少于5 h,行走活动的时间至少为1.5 h。矫正周期设定为12个月进行评估^[12]。在试穿期间,如果出现局部不适,可以进行适当调整,但整体结构不应进行重大更改。除此之外,观察组与对照组分别给予以下治疗:避免高强度的运动(定义为>3 METs运动),穿宽松舒适的鞋子;定制化康复方案:(1)红外线照射30 min/次,3次/日;(2)足趾抓毛巾训练(10次/组,3组/日);(3)口服塞来昔布0.2 g/日,服用2周。治疗时间为12个月。对比分析在穿着副舟骨疼痛综合征防护鞋及配套的鞋垫3个月、6个月及12个月后观察组和对照组的数据。

1.4 总体疗效观察

1.4.1 总有效率

根据《足踝外科疗效评价专家共识2021》,治疗组与对照组疗效的评估标准如下:治愈(VAS评分 ≤ 1 , AOFAS评分 ≥ 90);显效(VAS评分下降 $\geq 50\%$, AOFAS评分 ≥ 80);有效(VAS评分下降 $\geq 30\%$, AOFAS评分 ≥ 70);无效(未达到上述标准)。总有效率的计算公式为:总有效率(%) =

(治愈病例数 + 显效病例数 + 有效病例数) / 总病例数 $\times 100\%$ 。

1.4.2 疼痛缓解

采用VAS评分法来评估疼痛的程度,其中0分表示无痛,10分表示剧痛。患者在标尺上指示疼痛的具体位置,记录相应的分值。我们收集治疗组及对照组所有患者在治疗前、治疗后6个月及12个月的患足内侧中部VAS评分数据。

1.4.3 AOFAS 中足评分

采用盲法进行评估,根据AOFAS评分标准的中足部评分量表,涵盖疼痛、功能等方面。该量表的满分为100分,得分越高则表示足部功能越佳。分别对治疗组与对照组在治疗前、治疗后6个月及12个月的足部功能进行评估。

1.4.4 胫骨后肌肉肌张力测定

利用MyotonPRO数字化肌肉功能评估系统(Myoton AS, Peterburi Rd 2F, Tallinn 11415, stonia)对胫骨后肌肉的肌张力进行测定。检查员将MyotonPRO的探头垂直放置于胫骨后肌肌肉与肌腱结合处的肌腹,以获取肌肉刚度的测量值。设备探测头垂直施压于目标肌肉的肌腹,直至设备的红灯转为绿灯(表示设备设置的测试范围内),通过绿灯的亮起以识别设备启动的机械脉冲力,探头传输信息,记录自然阻尼振荡频率(F , Oscillation Frequency)(Hz),设备设置为重复测量5次,以取平均值进行记录。

1.4.5 标准化RMS相对值计算

利用表面肌电测试系统(意大利BTS公司生产的FREEEMG300无线表面肌电采集与分析系统,采集频率1 000 Hz)测定RMS。标准化RMS相对值(%) = (每块肌肉RMS值/腓骨长肌RMS值) $\times 100\%$ 。

2 数据处理与分析方法

数据分析采用SPSS 30.0.0统计软件。计量资料以均值和标准差($\bar{x} \pm s$)的形式表示。组内采用重复测量方差分析,组间方差齐性且服从正态分布的计量资料采用两独立样本 t 检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3 结果分析

3.1 总体疗效评价

所有患者均成功完成随访。经过12个月的观察,观察组的有效率为57.14%,而对照组为

28.57%。观察组的有效性显著高于对照组，且差异具有统计学意义。对于总有效率，观察组高于对照组，如表 1 所示。

表 1 总有效率比较					
组别	例数	治愈	改善	无效	总有效率 (%)
观察组	35	10	15	10	25
		(28.57)*	(42.85)*	(28.57)	(71.43)*
对照组	35	1	9	25	10
		(2.86)	(25.71)	(71.43)	(28.57)

注：“*”表示观察组与对照组相比较 $P<0.05$ 。

3.2 疼痛评估对比

治疗前，两组患足疼痛 VAS 评分基线无明显差异 ($P>0.05$)。观察组与对照组疼痛缓解程度比较，观察组在治疗 3 个月时较治疗前 VAS 评分有明显降低 ($P<0.05$)，随后 6 个月逐步降低 ($P<0.05$)，12 个月达到最低 ($P<0.05$)，同时在 3 个月、6 个月及 12 个月时 VAS 评分观察组较对照组有显著的差异 ($P<0.05$)，而对照组仅在 3 个月时间点时 VAS 较治疗前有改善 ($P<0.05$)。这些结果表明，观察组较对照组在观察期内更能有效地缓解疼痛 (表 2)。

表 2 疼痛评分比较 ($\bar{x}\pm s$)					
组别	例数	治疗前	治疗 3 个月	治疗 6 个月	治疗 12 个月
观察组	35	5.23±	4.68±	4.25±	3.12±
		1.21	0.53*▲	1.16*▲	1.33*▲
对照组	35	5.12±	4.53±	4.82±	4.95±
		1.62	0.48*	0.78	0.46

注：“*”表示与治疗前比较 $P<0.05$ ，“▲”表示与对照组比较 $P<0.05$ ，下同。

3.3 AOFAS 中足评分

治疗前，两组患者的 AOFAS 中足评分对比差异无统计学意义 ($P>0.05$)。观察组中足评分在治疗后 3 个月、6 个月及 12 个月均较治疗前明显的好转 ($P<0.05$)；对照组在治疗后 3 个月 AOFAS 中足评分有明显提高 ($P<0.05$)，6 个月及 12 个月后较治疗前无明显提高；6 个月及 12 个月观察组较对照组 AOFAS 中足评分有明显的提高 ($P<0.05$)。这些结果表明，观察组较对照组能有效地改善中足功能 (表 3)。

表 3 中足 AOFAS 评分比价 ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	治疗前	治疗 3 个月	治疗 6 个月	治疗 12 个月
观察组	35	72.23±	78.34±	83.42±	85.36±
		5.62	3.27*	1.16*▲	1.33*▲
对照组	35	74.34±	79.25±	80.13±	78.34±
		4.25	4.89*	2.31	2.46

3.4 胫骨后肌张力

治疗前，两组胫骨后肌肌张力基线无统计学差异 ($P>0.05$)。观察组在 3 个月时间点胫骨后肌肌张力较治疗前降低 ($P<0.05$)，随后在 3 个月、6 个月及 12 个月时间点均较治疗前降低 ($P<0.05$)；而对照组，胫骨后肌肌张力治疗前及治疗后的 3 个月、6 个月及 12 个月后差异无统计学意义。在治疗后 3 个月、6 个月及 12 个月时间点观察组较对照组差异有统计学意义 ($P<0.05$)。该结果表明，观察组较对照组更能改善副舟骨综合征患者胫骨后肌肌张力。

表 4 胫骨后肌张力的比较 ($\bar{x}\pm s$)

					Hz
组别	例数	治疗前	治疗 3 个月	治疗 6 个月	治疗 12 个月
观察组	35	24.24±	22.34±	20.25±	18.67±
		1.65	1.32*▲	1.21*▲	2.12*▲
对照组	35	23.98±	23.14±	22.43±	23.52±
		1.43	1.27	1.45	1.23

3.5 行走时小腿肌电特征

治疗前，行走时观察组与对照组副舟骨综合征患者患侧胫前肌、腓骨长肌、腓肠肌内侧头、腓肠肌外侧头标准化 RMS 相对值差异无统计学意义 (表 5)。治疗 12 个月时，观察组胫骨前肌标准化 RMS 相对值低于对照组 ($P<0.05$)，同时也低于治疗前 ($P<0.05$)，而腓肠肌外侧头标准化 RMS 相对值要高于对照组 ($P<0.05$)，同时也高于治疗前 ($P<0.05$) (表 6)。该结果表明，观察组胫骨前肌的神经肌肉控制水平变弱，而腓肠肌外侧头的神经肌肉控制水平增强。

4 讨论

传统的保守治疗只是解决副舟骨引起的疼痛症状，提高疼痛阈值，但对足弓的结构、胫骨后肌的

表 5 治疗前行走时受试者患侧部分肌肉标准化 RMS 相对值对比

组别	例数	胫骨前肌	腓骨长肌	腓肠肌内侧头	腓肠肌外侧头
观察组	35	1.25±	1.00±	1.41±	0.94±
		0.35	0.00	0.23	0.34
对照组	35	1.23±	1.00±	1.38±	0.92±
		0.28	0.00	0.25	0.32

表 6 治疗 12 个月行走时受试者患侧部分肌肉标准化 RMS 相对值对比

组别	例数	胫骨前肌	腓骨长肌	腓肠肌内侧头	腓肠肌外侧头
观察组	35	0.95±	1.00±	1.41±	1.38±
		0.21*▲	0.00	0.24	0.35*▲
对照组	35	1.22±	1.00±	1.38±	0.93±
		0.26	0.00	0.23	0.33

肌张力以及运动时能量的储存及释放无明显影响, 所以副舟骨处疼痛会反复发作, 影响生活质量^[13]。副舟骨疼痛综合征的发生往往与内侧足弓的疲劳和压力集中密切相关。专业的防护鞋通过足弓承托的设计, 能够分散施加在足部的压力, 避免由于长时间高负荷训练而引起的疼痛和损伤。研究表明, 副舟骨疼痛综合征防护鞋和鞋垫能够有效改善副舟骨综合征患者的足部形态并降低足底压力^[14], 保持足部的稳定性, 减轻副舟骨的疼痛感^[15]。这一设计结合了近年的研究成果, 针对副舟骨疼痛的具体发病机制, 提供了针对性的解决方案。

尽管研究指出副舟骨综合征患者与分子及免疫机制有关^[16], 主流的研究还是集中在胫骨后肌肌张力过高及在足底产生更快的冲击力^[17-18], 胫骨后肌的功能主要是维持内足弓的稳定和支撑, 但其肌张力过高时会引起痉挛、僵硬, 导致足部的负荷增加, 进一步加重副舟骨的损伤, 引起疼痛的症状^[19]。本研究中测量胫骨后肌肌张力, 发现随着副舟骨综合征防护鞋及鞋垫的使用, 治疗 3 个月后胫骨后肌肌张力值显著降低, 这表明其在降低胫骨后肌张力方面发挥了积极作用, 可能与内足弓的抬高有关。值得注意的是, 内足弓的抬高并不仅仅是一个简单的物理变化, 它还可能改变整体下肢的生物力学特性, 进而影响运动时脚部的受力状态。通过

减轻胫骨后肌的负荷, 缓解与之相关的疼痛, 改善运动表现。这为理解副舟骨疼痛的发病机制提供了新的思路, 同时也为防护鞋的设计提供了科学依据。

表面肌电信号包含了肢体运动的相关信息^[20], RMS 反映肌电信号幅度的大小, 其值越大, 表示肌肉激活程度越高^[21]。通过对标准化 RMS 相对值的分析, 可以对不同肌肉的疲劳进行识别, 预测跌倒风险^[22-23]。在向前迈步时主要由胫骨前肌负责^[24]。本研究中, 观察组在穿戴副舟骨综合征防护鞋及鞋垫 12 个月时, 胫骨前肌标准化 RMS 相对值降低, 而腓骨肠肌外侧头标准化 RMS 相对值升高, 说明观察组胫骨前肌神经肌肉控制水平变弱, 而腓肠肌外侧头神经肌肉控制水平增强, 这与以往的研究相反^[25]。可能原因为观察组随着副舟骨综合征防护鞋及鞋垫的穿戴, 足弓适度升高, 胫骨前肌不需要较大的激活水平控制足背屈, 由于足内侧疼痛缓解, 患者的跖屈活动的增加, 其腓肠外侧头的激活水平也变高, 趋向于正常的步态。

尽管现有的防护鞋设计具有一定优势, 但在实际应用中, 许多鞋垫的制作主要依赖于脚型石膏取模, 可能缺乏对足底内外侧纵弓压力指标的精确评估^[22]。现今的个性化设计尚不够全面, 无法充分反映不同个体在各类运动下的需求。不同高度、位置及大小的鞋垫在改变足底压力分布的同时, 应结合具体的生物力学数据, 从而避免由于应力集中引起的副舟骨疼痛, 并有效提高患者的舒适度。未来的研究应重视鞋垫动态压力分布的测量与分析, 探索更加精细化的设计方案, 以满足多样化的训练需求。理想情况下, 结合先进的足部扫描技术与力学分析软件, 设计出适合不同运动强度与地形条件的个性化防护鞋, 以达到更理想的防护效果。同时, 不同身高、体重和运动方式的士兵在鞋垫设计上也需要考虑个体差异, 确保最佳的运动性能和舒适体验。

5 结论

本研究得出如下结论:

- (1) 副舟骨疼痛综合征防护鞋及鞋垫能够缓解副舟骨综合征的疼痛;
- (2) 副舟骨疼痛综合征防护鞋及鞋垫能改善中足功能状态;
- (3) 副舟骨疼痛综合征防护鞋及鞋垫通过适度抬高足弓, 降低胫骨后肌肌张力;
- (4) 副舟骨疼痛综合征防护鞋及鞋垫可

使胫骨前肌神经肌肉控制水平变弱,而腓肠肌外侧头神经肌肉控制水平增强。

但本研究也存在不足:(1)本研究只关注大运动量的男性年轻士兵,不具有群体广泛性,后期应关注不同群体、职业及年龄的人群等;(2)由于胫骨后肌肉位置较深,在测量胫骨后肌刚度值时只能选择在跟腱内侧胫骨后肌与跟腱结合处,可能导致部分测量结果的偏差;(3)样本量较小,缺乏长期跟踪的随访数据,可能影响结果的普遍性。总之,本研究表明副舟骨疼痛综合征防护鞋及鞋垫作为保守治疗手段之一在治疗副舟骨综合征患者具有显著的治疗效果,能够改善患者疼痛和功能状态,未来应继续探讨其在临床应用中的潜力和价值。

参考文献:

- [1] MULKERRIN P, MCLOUGHLIN R, O'KEEFFE S T. Accessory navicular syndrome as a cause of foot pain during stroke rehabilitation[J]. *Age Ageing*, 2018, 48(1): 159-161.
- [2] CHEONG I Y, KANG H J, KO H, et al. Genetic influence on accessory navicular bone in the foot: A Korean twin and family study[J]. *Twin Res Hum Genet*, 2017, 20(3): 236-241.
- [3] MANSOOR S N, RATHORE F A. Symptomatic accessory navicular bone: A case series[J]. *Egypt Rheumatol*, 2017, 39(4): 263-266.
- [4] ADACHI S, MAENOHARA Y, JUJI T, et al. Progressive flat-foot deformity accompanied with avulsion and dislocation of accessory navicular[J]. *Foot Ankle Surg Tech Rep Cases*, 2023, 3(2): 100297.
- [5] WANG Y, HAO Y, SUN X, et al. Clinical effects of tibial posterior tendon reconstruction in the treatment of young athletes with accessory navicular bone syndrome[J]. *Musculoskelet Neuronal Interact*, 2024, 24(1): 34-40.
- [6] 李明秀,王轩,常鑫,等. 副舟骨合并平足畸形诊治进展[J]. *国际骨科学杂志*, 2022, 43(6): 352-356.
- [7] LEE L H, ADEDAPO A. Evidence-based treatment of accessory navicular bone[M]//*Paediatric Orthopaedics*. Springer, 2016: 487-493.
- [8] MESSER M, BRADY C, COLA K, et al. Effectiveness of non-operative treatment of symptomatic accessory navicular in pediatric patients[J]. *Foot Ankle Orthop*, 2018, 3(3): 1-6.
- [9] 康强军,王占星,饶辉,等. 副舟骨疼痛综合征防护鞋的生物力学分析[J]. *中国皮革*, 2024, 53(8): 73-77.
- [10] MILLER T T, STARON R B, FELDMAN F, et al. The symptomatic accessory tarsal navicular bone: Assessment with MR imaging[J]. *Radiology*, 1995, 195(3): 849-853.
- [11] KAMEL S I, BELAIR J A, HEGAZI T M, et al. Painful type II os naviculare: Introduction of a standardized, reproducible classification system[J]. *Skeletal Radiol*, 2020, 49(12): 1977-1985.
- [12] 陈双. 本体感觉刺激足垫结合运动疗法对儿童内八字步态的康复疗效研究[D]. 南京:南京体育学院, 2022.
- [13] 赖华兵,赵维维,李梅,等. 康复治疗结合计算机辅助设计与制作矫形鞋垫对副舟骨炎的疗效研究[J]. *华西医学*, 2023, 38(4): 512-518.
- [14] PU X, XING W, CHENG Z, et al. Effects of customized orthoses on foot morphology and pressure in patients with accessory navicular syndrome[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2025, 26(1): 491.
- [15] LEE Y H, HONG W H. Effects of shoe inserts and heel height on foot pressure, impact force, and perceived comfort during walking[J]. *Appl Ergon*, 2005, 36(3): 355-362.
- [16] LIU B, WEI R, WANG Y, et al. Integrative proteomics and phosphoproteomics profiling of symptomatic accessory navicular bone based on tandem mass tag technology[J]. *Int J Gen Med*, 2024, 17: 6207-6218.
- [17] MOONGILPATTI SENGODAN M, NITYANANDAN K, MARASAMY Y. Painful accessory navicular syndrome: A modified Kidner procedure[J]. *J Orthop Spine*, 2024, 11: 61-66.
- [18] GANGULY J, KULSHRESHTHA D, ALMOTIRI M, et al. Muscle tone physiology and abnormalities[J]. *Toxins*, 2021, 13(4): 282.
- [19] XIAO F, WANG Y, HE L, et al. Motion estimation from surface electromyogram using adaboost regression and average feature values[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 13121-13134.
- [20] 方博儒,仇大伟,白洋,等. 表面肌电信号在肌肉疲劳研究中的应用综述[J]. *计算机科学与探索*, 2024, 18(9): 2261-2275.
- [21] MORENO-BARRIGA O S, ROMERO-MORALES C, BECERRO-DE-BENGOA-VALLEJO R, et al. Effects of foot structure type on core stability in university athletes[J]. *Life*, 2023, 13(7): 1487.
- [22] MONIRI A, TERRACINA D, RODRIGUEZ-MANZANO J, et al. Real-time forecasting of sEMG features for trunk muscle fatigue using machine learning[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2021, 68(2): 718-727.
- [23] PERERA C K, GOPALAI A A, AHMAD S A, et al. Muscles affecting minimum toe clearance[J]. *Front Public Health*, 2021, 9: 612064.
- [24] RINGLEB S I, KAVROS S J, KOTAJARVI B R, et al. Changes in gait associated with acute stage II posterior tibial tendon dysfunction[J]. *Gait Posture*, 2007, 25(4): 555-564.
- [25] CHEUNG J T, ZHANG M. A 3-dimensional finite element model of the human foot and ankle for insole design[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(2): 353-358.