

二维超声联合弹性成像诊断足底筋膜炎的临床价值

李丹平¹, 赵云², 任亮³, 马文娟⁴, 胡兵¹

摘要 目的 探讨二维超声、应变式弹性成像(SE)、剪切波弹性成像(SWE)联合应用诊断足底筋膜炎(PF)的临床价值。方法 选取经临床确诊的 PF 患者 140 例(病例组)和健康志愿者 200 例(对照组),所有受试者均接受二维超声、SE 及 SWE 检查,比较两组足底筋膜厚度、应变比及剪切波速度的差异。绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析各参数单独及联合应用对 PF 的诊断效能。结果 病例组与对照组足底筋膜厚度、应变比、剪切波速度比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$)。ROC 曲线分析显示,足底筋膜厚度、应变比、剪切波速度诊断 PF 的曲线下面积分别为 0.975、0.889、0.981,截断值分别为 3.95 mm、0.75、3.75 m/s,灵敏度分别为 87.1%、89.3%、99.3%,特异度分别为 94.5%、77.0%、88.5%;三者联合应用诊断 PF 的曲线下面积为 0.993,高于各参数单独应用,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。结论 PF 患者的足底筋膜厚度增加、硬度降低,二维超声、SE、SWE 联合应用可提高对 PF 的诊断效能,有一定的临床价值。

关键词 超声检查;剪切波弹性成像;足底筋膜炎;联合诊断

[中图法分类号]R445.1

[文献标识码]A

Clinical value of two-dimensional ultrasound combined with elastography in the diagnosis of plantar fasciitis

LI Danping¹, ZHAO Yun², REN Liang³, MA Wenjuan⁴, HU Bing¹

1.Department of Ultrasound Imaging, Renhe Hospital Affiliated to China Three Gorges University, Yichang 443001, China.

2.School of Medicine, China Three Gorges University, Yichang 443002, China.3.Department of Ultrasound Medicine,

Yiling Hospital of Yichang, Yichang 443100, China.4.Tianjin Medical University, Tianjin 300203, China

ABSTRACT Objective To investigate the clinical value of the combined application of two-dimensional ultrasound, strain elastography (SE) and shear wave elastography (SWE) in the diagnosis of plantar fasciitis (PF). **Methods** A total of 140 clinically diagnosed PF patients (case group) and 200 healthy volunteers (control group) were selected. All subjects underwent two-dimensional ultrasound, SE and SWE, the differences of plantar fascia thickness, strain ratio and shear wave velocity between the two groups were compared. Receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn to analyze the diagnostic efficacy of each parameter alone and in combination for PF. **Results** There were significant differences in plantar fascia thickness, strain ratio and shear wave velocity between the case group and the control group (all $P < 0.001$). ROC curve analysis showed that the area under the curve of plantar fascia thickness, strain ratio and shear wave velocity in the diagnosis of PF were 0.975, 0.889 and 0.981, respectively, and cut-off values were 3.95 mm, 0.75 and 3.75 m/s, the sensitivities were 87.1%, 89.3% and 99.3%, and the specificities were 94.5%, 77.0% and 88.5%, respectively. The area under the curve of the combination of the three parameters in the diagnosis of PF was 0.993, which was higher than that of each parameter alone, the differences were statistically significant (all $P < 0.05$). **Conclusion** The thickness of plantar fascia increased and the hardness decreased in PF patients, and the combined application of two-dimensional ultrasound, SE and SWE can improve the diagnostic efficiency of PF, which has a certain clinical value.

KEY WORDS Ultrasonography; Shear wave elastography; Plantar fasciitis; Combined diagnosis

基金项目:国家自然科学基金项目(82072004)

作者单位:1.三峡大学附属仁和医院超声影像科,湖北宜昌 443001;2.三峡大学医学院,湖北宜昌 443002;3.宜昌市夷陵医院超声医学科,湖北宜昌 443100;4.天津医科大学,天津 300203

通讯作者:胡兵, Email: hurhcs@yeah.net

足底筋膜炎(plantar fasciitis, PF)是引起成人非外伤性足跟疼痛的最常见原因之一,全球人群的患病率约为10%^[1]。该病是由重复性劳损引起筋膜发生反复细微损伤而导致的退行性改变^[2],虽具有自限性,但其病情进展会严重影响患者活动,进而对生活质量产生负面影响^[3]。PF的诊断主要依据患者起步时足跟疼痛加重病史和体格检查中发现局部压痛点,目前临床尚无统一的诊断标准。二维超声可直观反映足底筋膜的厚度变化,应变式弹性成像(strain elastography, SE)、剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)则分别能半定量和定量评估足底筋膜硬度。本研究旨在探讨二维超声、SE、SWE联合应用在PF诊断中的临床价值,以期为临床诊断提供可靠的影像学依据。

资料与方法

一、研究对象

选取2023年7月至2024年7月于我院和宜昌市夷陵医院骨科及康复科就诊的PF患者140例为病组,男52例,女88例,年龄19~79岁,平均(56.04±10.99)岁。纳入标准:①经临床确诊为单侧PF,诊断参考2014年Martin等^[4]提出的《脚后跟疼痛-足底筋膜炎:2014修订版》标准(即晨起或长时间休息后,行走时足跟部出现针刺样疼痛,前几步尤为明显,随后疼痛有所缓解;长时间行走或负重后,足跟部再次出现针刺样疼痛;触诊时跟骨内侧结节区域呈压痛和触痛;绞车试验阳性);②疼痛持续时间>3个月;③未接受皮质激素注射、冲击波治疗或手术治疗;④自愿配合完成相关检查和随访。排除标准:①有足弓异常、足部畸形或跟骨骨折等病史;②有皮肤病、严重器质性疾病、精神障碍或凝血功能异常病史;③妊娠期患者。另选同期健康志愿者200例为对照组,男49例,女151例,年龄38~79岁,平均(55.85±9.03)岁。本研究经我院医学伦理委员会批准,受试者均签署知情同意书。

二、仪器与方法

1. 超声检查:使用GE Logiq Fortis Plus彩色多普勒超声诊断仪器,L3-12探头,频率3~12 MHz;内置SE和SWE分析软件。受试者取俯卧位,足部悬垂于床沿,由同一经验丰富的超声医师应用二维超声行纵切面扫查,观察筋膜跟骨止点边缘及内部纤维结构回声,并于跟骨止点水平纵切面测量足底筋膜厚度。见图1,2。然后进行SE检查,将探头轻置于受试者足底,进入弹性成像模式,取样框定位于足底筋膜跟骨



图1 超声检查体位示意图

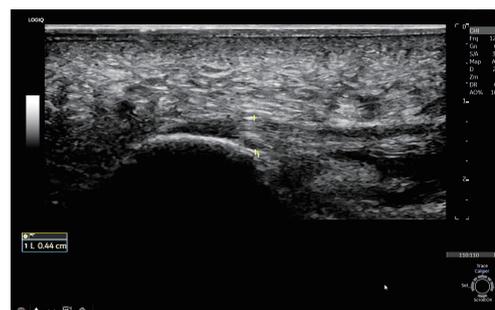


图2 二维超声测量足底筋膜厚度示意图

止点处。根据屏幕上显示的视觉质控指标,调整探头施加的压力,经过至少3个压缩-减压循环后,显示出最佳应变图像,此时屏幕左侧显示质量良好的二维图像(边界清晰、纵向排列的足底筋膜),屏幕右侧显示最佳弹性图像。选择足底筋膜病变区域(E1)及邻近皮下软组织区域(E2)作为感兴趣区,分别测量其应变值,每个部位重复测量3次取其平均值,计算E2与E1应变值比值即为足底筋膜应变比。随后进行SWE检查,取跟骨止点水平纵切面,将质量控制图像与彩色编码弹性图像同步显示在屏幕上,其中弹性图像的颜色表示足底筋膜的相对硬度,颜色范围从红色(硬)到蓝色(软)变化。每例受试者记录3张足底筋膜图像,并于足底筋膜跟骨止点处(感兴趣区直径2.5 mm)重复测量3次,取平均值即为足底筋膜剪切波速度。

2. 临床资料收集:包括受试者年龄、性别、体质量指数、职业类型等。

三、统计学处理

应用SPSS 27.0统计软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用独立样本 t 检验;不符合正态分布的计量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,组间比较采用Mann-Whitney U 检验。计数资料

以频数或率表示,组间比较采用 χ^2 检验。绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析各参数单独及联合应用对 PF 的诊断效能,曲线下面积(AUC)比较采用 DeLong 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、病例组与对照组临床资料比较

病例组与对照组性别、职业类型、体质量指数比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);年龄比较差异无统计学意义。见表 1。

二、病例组与对照组足底筋膜超声参数比较

病例组与对照组足底筋膜厚度、应变比、剪切波速度比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$)。见表 1 和图 3,4。

三、ROC 曲线分析

ROC 曲线分析显示,足底筋膜厚度、应变比、剪切波速度诊断 PF 的 AUC 分别为 0.975、0.889、0.981,截断值分别为 3.95 mm、0.75、3.75 m/s,灵敏度分别为 87.1%、89.3%、99.3%,特异度分别为 94.5%、77.0%、88.5%;三者联合应用诊断 PF 的 AUC 为 0.993,高于各参数单独应用,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$),对应的灵敏度为 97.1%,特异度为 96.0%。见表 2 和图 5。

表 1 病例组与对照组临床资料、足底筋膜超声参数比较

组别	性别(例)		年龄(岁)	职业类型(例)		体质量指数 (kg/m ²)	足底筋膜超声参数		
	男	女		非体力劳动	体力劳动		厚度(mm)	应变比	剪切波速度(m/s)
对照组(200)	49	151	55.85±9.03	104	96	24.25±3.20	3.1(2.7,3.5)	0.5(0.4,0.7)	4.2(4.1,4.4)
病例组(140)	52	88	56.04±10.99	18	122	25.65±3.41	4.8(4.2,5.4)	1.2(0.8,1.5)	3.2(3.1,3.4)
$\chi^2/t/Z$ 值	6.304		-1.167	54.844		-3.842	-14.924	-12.240	-15.157
P 值	0.012		0.868	<0.001		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

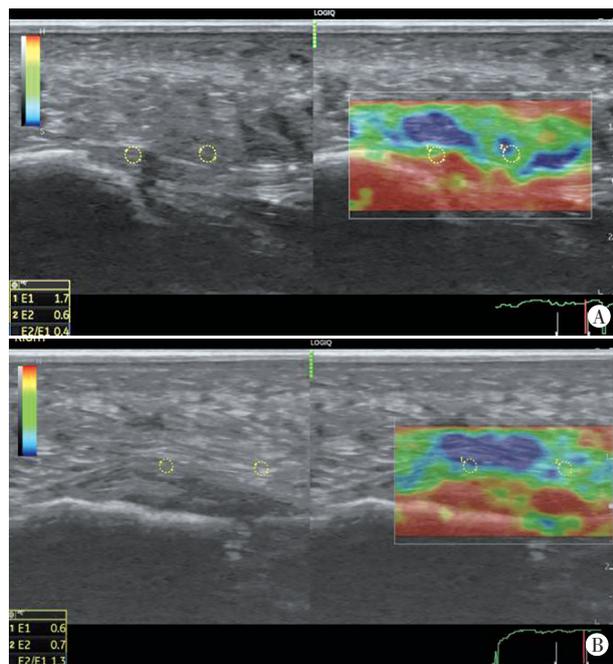


图 3 两组 SE 图
A: 对照组—54 岁女性志愿者足底筋膜应变比为 0.4; B: 病例组—51 岁男性患者足底筋膜应变比为 1.3

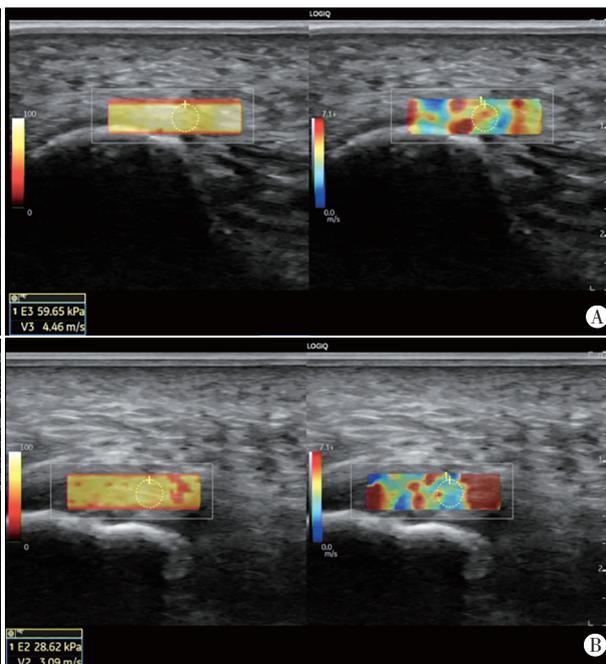


图 4 两组 SWE 图
A: 对照组—49 岁女性志愿者足底筋膜剪切波速度为 4.46 m/s; B: 病例组—58 岁男性患者足底筋膜剪切波速度为 3.09 m/s

表 2 足底筋膜各超声参数单独及联合应用诊断 PF 的效能

方法	截断值	灵敏度 (%)	特异度 (%)	约登指数	AUC 及其 95% 可信区间	P 值
厚度	3.95 mm	87.1	94.5	0.816	0.975(0.963~0.988)	<0.05
应变比	0.75	89.3	77.0	0.663	0.889(0.855~0.922)	<0.05
剪切波速度	3.75 m/s	99.3	88.5	0.878	0.981(0.970~0.992)	<0.05
三者联合应用	0.46	97.1	96.0	0.931	0.993(0.987~0.999)	<0.05

AUC: 曲线下面积

讨 论

PF 是由于多种原因导致足底筋膜反复细微损伤而引起的慢性退行性疾病,主要表现为跟骨内侧结节处晨起痛、开步痛,且疼痛随运动加重。该病多发于 40~60 岁,长期站立、跑步、跳跃、肥胖、足部解剖异常及足内翻等均与 PF 的发生相关。Liu 等^[5]研究表明,

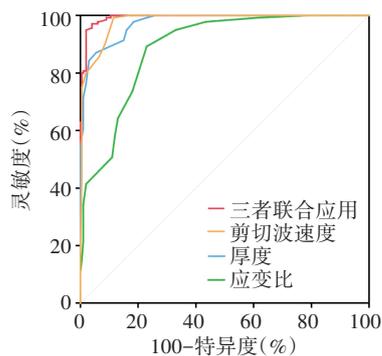


图5 足底筋膜各超声参数单独及联合应用诊断PF的ROC曲线图

年龄、性别和体质指数均与PF的发生密切相关, Johansen等^[6]研究认为, PF主要影响从事体育活动或职业负重活动的人群。本研究中病例组体质指数明显高于对照组, 且病例组中女性患者多于男性、体力劳动者占比高于非体力劳动者占比(均 $P<0.05$), 与上述研究结果一致。PF的诊断主要依赖病史和体格检查, 目前临床尚缺乏统一的诊断标准。MRI的软组织分辨率高, 是评估PF的首选检查方式, 但其价格昂贵、禁忌证多、检查时间长, 临床推广应用受限。超声对PF的诊断准确率与MRI相似^[7], 可直观反映足底筋膜形态和硬度, 且具有安全无创、易于推广、成本较低、重复性好等优点。本研究通过探讨二维超声、SE、SWE联合应用在PF诊断中的临床价值, 旨在为临床诊断PF提供可靠的影像学依据。

足底筋膜是维持足纵弓的纤维结缔组织, 含有大量的胶原纤维, 在足的正常生物力学中发挥重要作用。PF的二维超声特征包括足底筋膜增厚、回声减低及筋膜周围水肿。Bm等^[8]研究显示PF患者足底筋膜厚度为 (5.07 ± 0.90) mm; Aggarwal等^[9]研究显示PF患者足底筋膜厚度常超过4.0 mm。但本研究发现部分PF患者的足底筋膜厚度不足4.0 mm, 分析可能是由于研究对象因地域问题在体格上具有差异所致。本研究病例组足底筋膜厚度大于对照组 $[4.8(4.2, 5.4)$ mm vs. $3.1(2.7, 3.5)$ mm], 差异有统计学意义($P<0.001$); ROC曲线分析显示足底筋膜厚度诊断PF的AUC为0.975, 以3.95 mm为截断值, 对应的灵敏度、特异度分别为87.1%、94.5%, 表明二维超声所测足底筋膜厚度对PF有良好的诊断价值。本研究所得截断值与既往研究^[10]结果相似(4 mm), 表明足底筋膜厚度诊断足底筋膜炎的截断值相对稳定, 可见二维超声在PF的诊断中是一种高效且可靠的工具。

由于部分PF患者足底筋膜的形态学变化并不明显, 导致其二维超声表现无特殊, 此时评估其力学特

性(如硬度、拉伸强度及粘弹性)则有助于进一步明确诊断。近年来超声弹性成像技术在肌肉骨骼疾病的研究充分证实了其临床应用价值, SE和SWE分别通过应变比和剪切波速度可对足底筋膜的硬度进行半定量和定量评估。Wu等^[11]研究结果显示, 与正常对照组比较, 病例组足底筋膜剪切波速度明显降低, 差异有统计学意义($P<0.05$), 提示PF患者足底筋膜硬度更软。分析与胶原纤维降解、方向性障碍、基质降解、黏液增加及血管成纤维细胞增生等有关。SE反映了组织的“相对硬度”, 是一种受主观因素影响较大的半定量技术, 而SWE作为一种定量且更客观的工具, 在评估软组织、韧带和肌腱硬度中发挥了重要作用。本研究病例组足底筋膜应变比高于对照组 $[1.2(0.8, 1.5)$ vs. $0.5(0.4, 0.7)]$, 差异有统计学意义($P<0.001$), 与孔繁亮等^[12]研究结果一致, 进一步证实了PF患者足底筋膜在负荷中出现的生物力学改变, 而SE能够有效反映这种变化, 为诊断PF提供了有力依据。Albano等^[13]和Baur等^[14]研究发现PF患者足底筋膜剪切波速度较健康志愿者显著降低, 表明PF患者足底筋膜硬度较健康人群更软。本研究结果与上述研究一致, 病例组足底筋膜剪切波速度显著低于对照组 $[3.2(3.1, 3.4)$ m/s vs. $4.2(4.1, 4.4)$ m/s], 差异有统计学意义($P<0.001$)。理论上, 应变比为足底筋膜病变区域与邻近皮下软组织的应变值比值, 较剪切波速度更能消除个体差异, 但本研究结果显示足底筋膜应变比诊断PF的AUC(0.889)低于剪切波速度(0.981), 差异有统计学意义($P<0.05$), 分析可能是因为SE易受操作者经验、压力均匀性及参考组织选择的影响。此外, 个体间筋膜厚度差异、受压深度等因素也可能影响应变比测值, 而SWE作为一种更加自动化和标准化的技术, 减少了人为因素干扰, 在PF诊断中表现更佳。本研究ROC曲线分析显示, 足底筋膜剪切波速度诊断PF的AUC、截断值、灵敏度、特异度分别为0.981、3.75 m/s、99.3%、88.5%, 所得截断值与Ramu等^[15]研究结果存在一定差异, 该研究显示足底筋膜杨氏模量值诊断PF的截断值为99.286 kPa, 根据公式计算出对应的剪切波速度为5.75 m/s, 但由于肌肉和骨骼组织的各向异性并不满足杨氏模量值计算公式的应用条件, 导致所得剪切波速度存在较大变异。本研究基于Zhu等^[16]制定的操作规范, 应用SWE直接测量足底筋膜剪切波速度, 不依赖密度假设, 能更真实地反映足底筋膜硬度变化。另外, 不同研究的患者群体在病程、年龄、病情严重程度等方面可能存在差异, 不同仪器的参数设置、算法及

探头型号也会影响剪切波速度的测量结果。因此,建议今后研究使用更大样本量及统一的设备和测量标准进行比较研究,进一步验证剪切波速度在 PF 诊断中的临床价值。

本研究联合二维超声所测足底筋膜厚度、SE 所测应变比和 SWE 所测剪切波速度进行 ROC 曲线分析,结果显示三者联合应用诊断 PF 的 AUC、灵敏度、特异度分别为 0.993、97.1%、96.0%,其 AUC 高于各参数单独应用,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$),表明综合多模态超声技术能更全面地反映疾病特征,从而提高诊断效能。单一参数仅反映某一方面的病理改变,如二维超声仅显示筋膜形态改变,SE 和 SWE 仅评估筋膜生物力学变化,而三者联合应用时通过整合结构和弹性参数,能减少因病程差异导致的误判,尤其对表现不典型的 PF 患者(如足底筋膜厚度正常但弹性显著异常者)更具诊断价值,不仅提高了诊断灵敏度和特异度,还为临床提供了更全面的评估手段,从而更好地指导临床治疗决策。

综上所述,PF 患者足底筋膜厚度增加、硬度降低,二维超声、SE、SWE 联合应用可提高对 PF 的诊断效能。但本研究纳入病例最终诊断均为临床诊断,且超声操作及数据测量由同一超声医师完成,未进行不同观察者之间的一致性分析,后续研究需进一步验证。

参考文献

- [1] Khammas ASA, Mahmud R, Hassan HA, et al. An assessment of plantar fascia with ultrasound findings in patients with plantar fasciitis: a systematic review[J]. *Ultrasound*, 2023, 26(1): 13-38.
- [2] Kim DH, Lee Y. Effect of dynamic taping versus kinesiology taping on pain, foot function, balance, and foot pressure in 3 groups of plantar fasciitis patients: a randomized clinical study[J]. *Med Sci Monit*, 2023, 29: e941043.
- [3] Hamstra-Wright KL, Huxel Bliven KC, Bay RC, et al. Risk factors for plantar fasciitis in physically active individuals: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Sports Health*, 2021, 13(3): 296-303.
- [4] Martin RL, Davenport TE, Reischl SF, et al. Heel pain-plantar fasciitis: revision 2014[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2014, 44(11): 1-33.
- [5] Liu P, Chen Q, Yang K, et al. Prevalence, characteristics, and associated risk factors of plantar heel pain in americans: the cross-sectional NHANES study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1): 805.
- [6] Johannsen FE, Rydahl JP, Jacobsen AS, et al. Foot posture and ankle dorsiflexion as risk factors for developing achilles tendinopathy and plantar fasciitis: a case-control study[J]. *Foot Ankle Int*, 2024, 45(12): 1380-1389.
- [7] 徐亚萍, 陈振亚. 肌肉骨骼超声在评估慢性足底筋膜炎中的应用研究[J]. *深圳中西医结合杂志*, 2022, 32(5): 34-36.
- [8] Bm SA, Tiwari V, Bakde AM, et al. Ultrasonographic assessment of indian patients with plantar fasciitis and its clinical correlation: a prospective observational study[J]. *Cureus*, 2023, 15(3): e35764.
- [9] Aggarwal P, Jirankali V, Garg SK. Evaluation of plantar fascia using high-resolution ultrasonography in clinically diagnosed cases of plantar fasciitis[J]. *Pol J Radiol*, 2020, 85: e375-e380.
- [10] Drake C, Whittaker GA, Kaminski MR, et al. Medical imaging for plantar heel pain: a systematic review and Meta-analysis[J]. *J Foot Ankle Res*, 2022, 15(1): 4.
- [11] Wu CH, Chiu YH, Chang KV, et al. Ultrasound elastography for the evaluation of plantar fasciitis: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Eur J Radiol*, 2022, 155: 110495.
- [12] 孔繁亮, 项东英, 车竞, 等. 多参数超声检查对足底筋膜炎应用分析[J]. *医学影像学杂志*, 2023, 33(9): 1647-1651.
- [13] Albano D, Messina C, Gitto S, et al. Shear-wave elastography of the plantar fascia: a systematic review and Meta-analysis[J]. *J Ultrasound*, 2023, 26(1): 59-64.
- [14] Baur D, Schwabl C, Kremser C, et al. Shear wave elastography of the plantar fascia: comparison between patients with plantar fasciitis and healthy control subjects[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(11): 2351.
- [15] Ramu HY, Sharma A, Kumar N, et al. Role of shear wave elastography in the diagnostic evaluation of plantar fasciitis: a prospective case-control study[J]. *J Ultrasound*, 2023, 26(2): 385-391.
- [16] Zhu J, Qiu L, Ta D, et al. Chinese ultrasound doctors association guideline on operational standards for 2-D shear wave elastography examination of musculoskeletal tissues[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2024, 50(2): 175-183.

(收稿日期: 2024-09-25)