

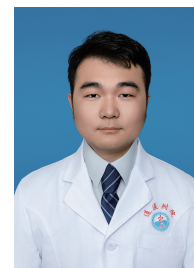
· 论 著 ·

本文亮点:

- (1) 通过二维超声和剪切波弹性成像(SWE)定量评估2型糖尿病患者胫神经和腓总神经的形态学及力学特征,为糖尿病周围神经病变(DPN)的无创影像学筛查提供参考。
- (2) 证实SWE测量的腓总神经硬度较二维超声测量的神经横截面积等常规超声参数对DPN具有更高的诊断价值,并与临床严重程度相关,可为早期识别DPN及评估其病情提供辅助依据。

Highlights:

- (1) This study quantitatively evaluated the morphological and mechanical characteristics of the tibial and common peroneal nerves in patients with type 2 diabetes using B-mode ultrasonography and shear wave elastography (SWE), providing a reference for non-invasive imaging screening of diabetic peripheral neuropathy (DPN).
- (2) It was suggested that the stiffness of the common peroneal nerve determined by SWE had higher diagnostic value for DPN than conventional ultrasonographic parameters such as nerve cross-sectional area determined by B-mode ultrasonography, and was correlated with clinical severity, providing supplementary evidence for early identification and severity assessment of DPN.



剪切波弹性成像对2型糖尿病患者 并发DPN的早期诊断价值

张演基¹ 唐铭远¹ 简扬¹ 吴秀平² 马礼鸿³ 蔡思浪⁴ 邓呈亮¹ 魏在荣¹

¹遵义医科大学附属医院烧伤整形外科,遵义 563000;²遵义医科大学附属医院超声科,遵义 563000;³贵州茅台医院急诊科,遵义 564512;⁴贵州茅台医院医教部,遵义 564512

通信作者:魏在荣,Email:zairongwei@163.com

【摘要】 目的 探讨剪切波弹性成像(SWE)对2型糖尿病患者并发糖尿病周围神经病变(DPN)的早期诊断价值。**方法** 该研究为诊断性病例对照研究。2021年5月—2022年10月,遵义医科大学附属医院收治68例符合入选标准的2型糖尿病患者,其中男45例、女23例,年龄(57 ± 10)岁,根据是否并发DPN将患者分为DPN组(38例)和非DPN组(30例);同期招募在该院体检中心体检的30名健康志愿者作为健康对照组,其中男19人、女11人,年龄(56 ± 10)岁。比较健康对照组志愿者和2组患者入院时采用彩色多普勒超声诊断仪在二维超声模式下测量的双侧腓总神经和胫神经横截面积、在SWE模式下测量的双侧腓总神经和胫神经硬度。在3组受试者中,筛选DPN发病的独立危险因素。在2组患者中,采用受试者操作特征曲线评价腓总神经硬度、腓总神经横截面积、胫神经硬度和胫神经横截面积诊断DPN的价值。分析DPN组患者腓总神经硬度、腓总神经横截面积与多伦多临床评分系统(TCSS)评分的相关性。**结果** DPN组患者入院时双侧腓总神经横截面积均显著大

DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20241230-00513

收稿日期 2024-12-30

引用本文:张演基,唐铭远,简扬,等.剪切波弹性成像对2型糖尿病患者并发DPN的早期诊断价值[J].中华烧伤与创面修复杂志,2026,42(7): 1-10. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20241230-00513.

Zhang Yanji, Tang Mingyuan, Jian Yang, et al. Value of shear wave elastography in the early diagnosis of DPN in patients with type 2 diabetes mellitus[J]. Chin J Burns Wounds, 2026, 42(7): 1-10. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20241230-00513.



于非 DPN 组患者和健康对照组志愿者 ($P < 0.05$), 且 DPN 组患者入院时右侧胫神经横截面积显著大于非 DPN 组 ($P < 0.05$)。非 DPN 组与 DPN 组患者入院时双侧胫神经和腓总神经硬度均显著高于健康对照组志愿者 ($P < 0.05$), DPN 组患者入院时左侧胫神经和双侧腓总神经硬度均显著高于非 DPN 组 ($P < 0.05$)。多因素有序 logistic 回归分析结果显示, 在 3 组受试者中, 腓总神经硬度、胫神经硬度、腓总神经横截面积均为 DPN 发病的独立危险因素 (OR 分别为 0.91、0.93、0.75, 95% CI 分别为 0.89~0.95、0.89~0.97、0.58~0.96, $P < 0.05$)。在 2 组患者中, 腓总神经硬度诊断 DPN 的曲线下面积最大, 为 0.85 (95% CI 为 0.74~0.92), 其最佳截断值为 75.29 kPa, 最佳截断值下的敏感度为 76.32%、特异度为 90.00%。在 DPN 组患者中, 腓总神经硬度、腓总神经横截面积均与 TCSS 评分呈显著正相关 (r_s 值分别为 0.83、0.89, $P < 0.05$)。 **结论** SWE 在评估 2 型糖尿病患者周围神经硬度方面表现优异, 其中 SWE 测量的腓总神经硬度对患者并发 DPN 具有较高的诊断价值, 并与临床严重程度相关, 可作为 DPN 早期筛查和病情评估的辅助影像学指标。

【关键词】 糖尿病; 胫神经; 诊断; 剪切波弹性成像; 腓总神经; 神经硬度; 神经横截面积

基金项目: 省部共建协同创新中心项目 (教科厅函〔2020〕39 号); 国家自然科学基金地区科学基金项目 (8236090280); 贵州茅台医院科研与人才培养资金 (mtk2022-13)

临床试验注册: 中国临床试验注册中心 (ChiCTR2200058061)

Value of shear wave elastography in the early diagnosis of DPN in patients with type 2 diabetes mellitus

Zhang Yanji¹, Tang Mingyuan¹, Jian Yang¹, Wu Xiuping², Ma Lihong³, Cai Silang⁴, Deng Chengliang¹, Wei Zairong¹

¹Department of Burns and Plastic Surgery, Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China; ²Department of Ultrasound, Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China; ³Department of Emergency, Kweichow Moutai Hospital, Zunyi 564512, China; ⁴Department of Medical Education, Kweichow Moutai Hospital, Zunyi 564512, China

Corresponding author: Wei Zairong, Email: zairongwei@163.com

【Abstract】 **Objective** To investigate the value of shear wave elastography (SWE) in the early diagnosis of diabetic peripheral neuropathy (DPN) in patients with type 2 diabetes mellitus. **Methods** This study was a diagnostic case-control study. From May 2021 to October 2022, 68 patients with type 2 diabetes mellitus who met the inclusion criteria were admitted to the Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, including 45 males and 23 females, aged (57±10) years. According to the presence or absence of DPN, the patients were divided into DPN group (38 patients) and non-DPN group (30 patients). During the same period, 30 healthy volunteers who underwent physical examinations at the health examination center of the hospital were recruited as healthy control group, including 19 males and 11 females, aged (56±10) years. Cross-sectional areas of the bilateral common peroneal nerves and tibial nerves measured using a color Doppler ultrasonography system in two-dimensional ultrasonography mode, and the stiffness of the bilateral common peroneal nerves and tibial nerves measured in SWE mode were compared among volunteers in healthy control group and two groups of patients at admission. Independent risk factors for the development of DPN were screened among the participants in the three groups. Among the two groups of patients, receiver operating characteristic curves were used to evaluate the diagnostic value of common peroneal nerve stiffness, common peroneal nerve cross-sectional area, tibial nerve stiffness, and tibial nerve cross-sectional area for DPN. The correlations of common peroneal nerve stiffness and common peroneal nerve cross-sectional area with the Toronto clinical scoring system (TCSS) score were analyzed in DPN group of patients. **Results** At admission, the cross-sectional areas of the bilateral common peroneal nerves of patients in DPN group were significantly larger than those of patients in non-DPN group and volunteers in healthy control group ($P < 0.05$); the cross-sectional area of the right tibial nerve of patients was also significantly greater in DPN group than in non-DPN group ($P < 0.05$). The stiffness of the bilateral tibial nerves and common peroneal nerves of patients in both non-DPN group and DPN group was significantly greater than that of volunteers in healthy control group ($P < 0.05$). The stiffness of the left tibial nerve and the bilateral common peroneal nerves of patients was significantly greater in DPN group than in non-DPN group ($P < 0.05$). The results of multivariable ordinal logistic regression analysis showed

that common peroneal nerve stiffness, tibial nerve stiffness, and common peroneal nerve cross-sectional area were independent risk factors for the development of DPN among the participants in the three groups (with *OR* of 0.91, 0.93, and 0.75, respectively, 95%*CI* of 0.89 to 0.95, 0.89 to 0.97, and 0.58 to 0.96, respectively, $P < 0.05$). Among the two groups of patients, common peroneal nerve stiffness yielded the largest area under the curve for diagnosing DPN, which was 0.85 (with 95%*CI* of 0.74 to 0.92). The optimal cutoff value was 75.29 kPa, with a sensitivity of 76.32% and a specificity of 90.00% at the optimal cutoff value. In DPN group, common peroneal nerve stiffness and common peroneal nerve cross-sectional area of patients were significantly positively correlated with the TCSS score (with r_s values of 0.83 and 0.89, respectively, $P < 0.05$).

Conclusions SWE performs well in assessing peripheral nerve stiffness in patients with type 2 diabetes mellitus. In particular, common peroneal nerve stiffness measured using SWE has relatively high diagnostic value for complication of DPN in patients and is correlated with clinical severity. It may serve as an auxiliary imaging marker for the early screening and severity assessment of DPN.

【Key words】 Diabetes mellitus; Tibial nerve; Diagnosis; Shear wave elastography; Common peroneal nerve; Nerve stiffness; Nerve cross-sectional area

Fund program: Collaborative Innovation Center of Chinese Ministry of Education (No. 2020-39); Regional Science Fund Project of National Natural Science Foundation of China (8236090280); Scientific Research and Talent Development Fund of Kweichow Moutai Hospital (mtky2022-13)

Trial registration: Chinese Clinical Trial Registry (ChiCTR2200058061)

近年来,糖尿病的全球患病率持续上升,该类疾病患者最常见的慢性并发症是糖尿病周围神经病变(diabetic peripheral neuropathy, DPN),发病率可达 50%^[1-3]。DPN 的主要病理改变为周围神经水肿及硬化,临床常表现为肢端麻木、刺痛、灼痛等感觉异常症状。随着病情进展,约 15% 的患者可能出现足部溃疡,严重者可发展为截肢,甚至死亡。因此,DPN 的及早识别与干预对改善糖尿病患者预后具有重要意义^[4-8]。当前临床主要依赖神经病变评分量表及神经传导检查(nerve conduction study, NCS)对 DPN 进行诊断,前者主观性强,易受环境及评估者影响;后者虽被视为“金标准”,但属于有创操作,且敏感性有限,通常在神经已出现明显脱髓鞘改变时才表现出参数异常^[9-12]。事实上,研究已证实糖尿病患者在出现明显 DPN 临床症状前即存在亚临床神经损伤^[13-15]。

近年来,影像学技术的不断更新为 DPN 的无创评估提供了新的可能。在 DPN 的筛查中,对比昂贵耗时的 MRI,超声的优势在于经济、可重复性强、有多种客观量化的指标。传统超声可提供神经横截面积、周长、回声结构等形态学信息,已有学者通过超声检查在 DPN 临床症状出现前观察到神经横截面积改变^[16-19]。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)作为新兴超声技术,能够通过探头激发组织剪切波并测量其传播速度,从而客观量化神经组织的硬度特性^[20-24]。基于上述背景,本研究旨在评估常规二维超声及 SWE 在 2 型糖尿病患

者并发 DPN 早期诊断中的价值。

1 对象与方法

本诊断性病例对照研究经遵义医科大学附属医院(以下简称本院)生物医学研究伦理委员会批准(批号:KLLY-2021-176),受试者均签署研究知情同意书。

1.1 入选标准

1.1.1 2 型糖尿病患者 纳入标准:(1)符合 1999 年世界卫生组织糖尿病诊断标准,并诊断为 2 型糖尿病;(2)年龄 18~75 岁;(3)能够配合完成多伦多临床评分系统(Toronto clinical scoring system, TCSS)评估、NCS 及双下肢超声检查。排除标准:(1)存在由非糖尿病因素引起的周围神经病变,如遗传性神经病变、酒精相关神经病变等病史;(2)合并颈椎病变、腰椎病变或其他可能影响下肢神经功能评估的疾病;(3)检查区域存在可能干扰超声检查或 NCS 的皮肤病变、明显水肿或感染;(4)有脑梗死或其他中枢神经系统疾病史;(5)有腿部或踝部相关手术史。

1.1.2 志愿者 纳入标准:(1)年龄 18~75 岁;(2)无糖尿病病史;(3)无 DPN 相关症状或既往诊断;(4)能够配合完成双下肢超声检查;(5)体检结果正常。排除标准同糖尿病患者。

1.2 样本量估算

本研究以 SWE 测量的腓总神经硬度诊断 DPN 的敏感度和特异度为主要评价指标,据此分别进行

DPN 与非 DPN 样本量估算。采用诊断试验样本量估算公式: $n = Z^2 \times P \times (1-P) \div \delta^2$, 其中 P 为预期敏感度或特异度, δ 为允许误差, Z 为标准正态分布中与双侧检验水准相对应的临界值。取检验水准 $\alpha = 0.05$ (双侧), 故 $Z = 1.96$; 根据既往相关研究及本研究预估结果, 预期 SWE 测量的腓总神经硬度诊断 DPN 的敏感度为 80.00%、特异度为 85.00%, 允许误差为 0.15。经计算, 至少需纳入 28 例 DPN 患者、22 例非 DPN 患者。考虑 15% 的无效或脱落, 至少需纳入 33 例 DPN 患者、26 例非 DPN 患者。

1.3 临床资料与分组比较

2021 年 5 月—2022 年 10 月, 本院收治 68 例符合入选标准的 2 型糖尿病患者, 其中男 45 例、女 23 例, 年龄 (57 ± 10) 岁; 同期招募在本院体检中心体检的符合入选标准的 30 名健康志愿者作为健康对照组。

根据入院时 TCSS 评分、NCS 结果及临床表现诊断 DPN, 根据是否并发 DPN 将患者分为 DPN 组 (38 例) 和非 DPN 组 (30 例)。(1) TCSS 评分。68 例糖尿病患者均接受 TCSS 评估, 评估项目包括下肢周围神经症状、腱反射 (踝反射、膝反射) 及感觉测试, 总分最高 19 分, 评分 ≥ 6 分时诊断为 DPN, 其中 6~8 分表示轻度 DPN, 9~11 分表示中度 DPN, 12~19 分表示严重 DPN^[10]。(2) NCS。TCSS 评分 ≥ 6 分的糖尿病患者进一步接受 NCS。NCS 均在本院肌电图室完成, 检测双侧腓总神经、胫神经运动传导及腓肠神经感觉传导参数, 并按照相关电生理学标准判定是否存在 DPN^[11]。(3) DPN 诊断, 参照《中国 2 型糖尿病防治指南 (2020 年版)》^[25] 及相关电生理诊断标准: 患者需有明确糖尿病病史, 神经病变发生在糖尿病确诊时或之后, 临床症状和体征符合糖尿病感觉运动性周围神经病变表现; 同时 NCS 提示腓肠神经至少 1 项参数异常, 且腓总神经或胫神经至少 1 项参数

异常。

健康对照组志愿者和 2 组患者入院时性别、年龄和体重指数比较, 差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。DPN 组患者入院时糖尿病病程、糖化血红蛋白水平及 TCSS 评分均显著高于非 DPN 组 ($P < 0.05$)。见表 1。

1.4 神经横截面积与硬度的超声测量

由同一名有经验的本院超声科医师, 采用美国通用电气医疗公司生产的 GE LOGIQ E9 型彩色多普勒超声诊断仪及配套高频线阵探头, 对 3 组受试者进行双侧胫神经和腓总神经横截面积与硬度的超声检查。(1) 检查胫神经时, 受检者取仰卧位, 双下肢自然放松, 小腿轻度外旋。先在二维超声模式下, 将探头置于内踝上方 3 cm 处, 获得胫神经清晰横断面图像后, 在神经束膜内缘勾画感兴趣区, 测量胫神经横截面积。随后将探头旋转 90°, 沿胫神经长轴获得纵断面图像, 切换至 SWE 模式, 待图像稳定后在神经内选取感兴趣区, 测量胫神经硬度。(2) 检查腓总神经时, 受检者取侧卧位, 双下肢略屈曲并自然放松。以腓骨小头为解剖标志, 将探头置于腓骨小头下方 2 cm 处, 同检查胫神经的方法测量腓总神经横截面积与硬度。检查过程中探头轻放于皮肤表面, 避免加压造成测量偏倚。每项参数每侧重复测量 3 次, 结果取平均值。见图 1。

1.5 分析方法

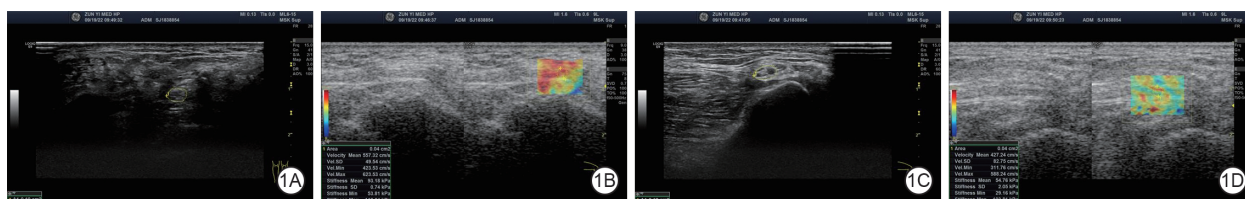
(1) 比较健康对照组志愿者和 2 组患者入院时采用彩色多普勒超声诊断仪在二维超声模式下测量的双侧腓总神经和胫神经横截面积、在 SWE 模式下测量的双侧腓总神经和胫神经硬度。(2) 在 3 组受试者中, 筛选 DPN 发病的独立危险因素。(3) 在 2 组患者中, 评估腓总神经硬度、腓总神经横截面积、胫神经硬度和胫神经横截面积对 DPN 的诊断价值。(4) 分析 DPN 组患者腓总神经硬度、腓总神经横截

表 1 健康对照组志愿者与 2 组 2 型糖尿病患者入院时一般资料比较

Table 1 Comparison of baseline characteristics among volunteers in healthy control group and two groups of patients with type 2 diabetes mellitus at admission

组别	例数/人数	性别 (例/人)		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	体重指数 (kg/m^2 , $\bar{x} \pm s$)	糖尿病病程 (年, $\bar{x} \pm s$)	糖化血红蛋白水平 (%, $\bar{x} \pm s$)	TCSS 评分 (分, $\bar{x} \pm s$)
		男	女					
DPN 组	38	28	10	57 ± 9	22.8 ± 2.9	9.4 ± 4.8	9.3 ± 2.0	9.7 ± 1.7
非 DPN 组	30	17	13	56 ± 10	24.2 ± 4.6	5.0 ± 2.9	8.0 ± 2.0	4.6 ± 1.7
健康对照组	30	19	11	56 ± 10	22.3 ± 2.2	—	—	—
统计量值		$\chi^2 = 2.22$		$F = 0.18$	$F = 2.62$	$t = 4.79$	$t = 2.64$	$t = 13.21$
P 值		0.330		0.834	0.087	<0.001	0.010	<0.001

注: DPN 为糖尿病周围神经病变, TCSS 为多伦多临床评分系统; “—”表示未检测或不适用



注:SWE为剪切波弹性成像

图 1 采用二维超声与SWE测量的1例并发糖尿病周围神经病变的2型糖尿病患者右侧腓总神经和胫神经横截面积与硬度。1A.腓骨小头下方2 cm处腓总神经横截面积的二维超声图像;1B.腓骨小头下方2 cm处腓总神经硬度的SWE图像;1C.内踝上3 cm处胫神经横截面积的二维超声图像;1D.内踝上3 cm处胫神经硬度的SWE图像

Figure 1 Cross-sectional area and stiffness of the common peroneal and tibial nerves on the right side measured by B-mode ultrasonography and SWE in a type 2 diabetes mellitus patient complicated with diabetic peripheral neuropathy

面积与TCSS评分的相关性。

1.6 统计学处理

采用SPSS 18.0统计软件进行数据分析,所有检验为双侧检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。计数资料数据以频数表示,组间比较采用 χ^2 检验。正态性及方差齐性检验显示,计量资料数据均符合正态分布且方差齐,用 $\bar{x} \pm s$ 表示,3组间比较采用单因素方差分析,事后两两比较采用LSD法。DPN组与非DPN组之间糖尿病病程、糖化血红蛋白水平及TCSS评分等的比较采用独立样本 t 检验,同一组受试者左右侧神经横截面积及硬度的比较采用配对样本 t 检验。

以3组受试者的疾病状态为因变量(DPN组=0、非DPN组=1、健康对照组=2),以年龄、体重指数、腓总神经硬度、胫神经硬度、腓总神经横截面积、胫神经横截面积为自变量(各连续变量均按实际测量值纳入模型),采用多因素有序logistic回归分析筛选DPN发病的独立危险因素。采用平行线检验评价回归模型是否满足比例优势假设, $P > 0.05$ 表示比例优势假设成立。采用似然比检验评价回归模型的整体有效性, $P < 0.05$ 表示纳入自变量后的模型优于仅含截距项的模型。采用Pearson检验和Deviance检验评价模型的拟合优度, $P > 0.05$ 表示未见模型存在明显拟合不足。采用McFadden伪 R^2 评价最终模型相对于仅含截距项模型的拟合改善程度,McFadden伪 $R^2 < 0.10$ 表示拟合改善较弱,0.10~<0.20表示拟合改善一般,0.20~0.40表示拟合改善较好,>0.40表示拟合显著改善。根据本研究因变量的赋值方向, $OR < 1$ 且 $P < 0.05$ 表示相应指标升高与疾病状态向DPN方向变化相关。

采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线评估指标对DPN的诊断价值,计算曲线下面积(area under the curve, AUC)及

其95%CI、最佳截断值、敏感度、特异度和约登指数。AUC>0.50~0.70表示诊断价值较低,AUC>0.70~0.80表示诊断价值中等,AUC>0.80~0.90表示诊断价值较高,AUC>0.90表示诊断价值很高。采用Spearman相关分析评估腓总神经硬度、腓总神经横截面积与TCSS评分的相关性。

2 结果

2.1 腓总神经与胫神经横截面积

DPN组患者入院时双侧腓总神经横截面积均显著大于非DPN组患者和健康对照组志愿者($P < 0.05$),且DPN组患者入院时右侧胫神经横截面积显著大于非DPN组($P < 0.05$)。见表2。

2.2 腓总神经与胫神经硬度

非DPN组与DPN组患者入院时双侧胫神经和腓总神经硬度均显著高于健康对照组志愿者($P < 0.05$),DPN组患者入院时左侧胫神经和双侧腓总神经硬度均显著高于非DPN组($P < 0.05$)。见表3。

2.3 DPN发病的独立危险因素

平行线检验结果显示,回归模型满足比例优势假设($\chi^2 = 6.17$,自由度为6.00, $P = 0.187$)。似然比检验结果显示,纳入自变量后的模型优于仅含截距项的模型($\chi^2 = 102.48$,自由度为6.00, $P < 0.001$)。Pearson检验和Deviance检验结果均显示,未见模型存在明显拟合不足(χ^2 值分别为214.39、129.52, P 值分别为0.108、>0.999)。McFadden伪 R^2 评价显示,最终模型较仅含截距项的模型拟合显著改善(McFadden伪 $R^2 = 0.48$)。多因素有序logistic回归分析结果显示,在3组受试者中,腓总神经硬度、胫神经硬度、腓总神经横截面积均为DPN发病的独立危险因素($P < 0.05$),见表4。

2.4 糖尿病人群中神经横截面积与硬度诊断DPN的价值

表 2 健康对照组志愿者与 2 组 2 型糖尿病患者入院时双下肢胫神经和腓总神经横截面积比较($\text{mm}^2, \bar{x} \pm s$)**Table 2** Comparison of cross-sectional areas of the bilateral tibial and common peroneal nerves among volunteers in healthy control group and two groups of patients with type 2 diabetes mellitus at admission

组别	例数/人数	胫神经		腓总神经		t_1 值	P_4 值	t_2 值	P_5 值
		左侧	右侧	左侧	右侧				
DPN 组	38	11.5±2.6	11.6±2.8	15.5±4.8	15.4±4.8	0.38	0.711	0.10	0.918
非 DPN 组	30	10.6±2.4	10.3±1.9	13.0±2.3	12.6±1.9	1.19	0.245	1.08	0.291
健康对照组	30	11.1±2.4	10.9±2.4	11.9±1.8	11.6±2.8	0.61	0.549	0.79	0.434
F 值		0.93	2.31	10.20	11.24				
P 值		0.399	0.105	<0.001	<0.001				
P_1 值		0.186	0.036	0.007	0.002				
P_2 值		0.580	0.316	<0.001	<0.001				
P_3 值		0.462	0.250	0.063	0.154				

注: DPN 为糖尿病周围神经病变; P_1 值、 P_2 值、 P_3 值分别为 DPN 组与非 DPN 组、DPN 组与健康对照组、非 DPN 组与健康对照组各指标比较所得, t_1 值与 P_4 值、 t_2 值与 P_5 值分别为各组左右侧胫神经、腓总神经比较所得

表 3 健康对照组志愿者与 2 组 2 型糖尿病患者入院时双下肢胫神经和腓总神经硬度比较($\text{kPa}, \bar{x} \pm s$)**Table 3** Comparison of the stiffness of the bilateral tibial and common peroneal nerves among volunteers in healthy control group and two groups of patients with type 2 diabetes mellitus at admission

组别	例数/人数	胫神经		腓总神经		t_1 值	P_4 值	t_2 值	P_5 值
		左侧	右侧	左侧	右侧				
DPN 组	38	57±16	53±16	89±33	87±26	0.24	0.814	0.42	0.677
非 DPN 组	30	46±15	48±13	59±16	60±13	-0.80	0.427	-0.49	0.627
健康对照组	30	34±10	38±13	43±16	45±13	-1.78	0.118	-0.47	0.644
F 值		19.74	8.95	32.18	43.14				
P 值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001				
P_1 值		0.006	0.165	<0.001	<0.001				
P_2 值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001				
P_3 值		0.004	0.004	0.001	<0.001				

注: DPN 为糖尿病周围神经病变; P_1 值、 P_2 值、 P_3 值分别为 DPN 组与非 DPN 组、DPN 组与健康对照组、非 DPN 组与健康对照组各指标比较所得; t_1 值与 P_4 值、 t_2 值与 P_5 值分别为各组左右侧胫神经、腓总神经比较所得

表 4 健康对照组志愿者与 2 组 2 型糖尿病患者 DPN 发病相关因素的多因素有序 logistic 回归分析结果**Table 4** Results of multivariable ordinal logistic regression analysis of related factors for the development of DPN among volunteers in healthy control group and two groups of patients with type 2 diabetes mellitus

变量	OR	95%CI	P 值
年龄(岁)	1.03	0.98~1.10	0.239
体重指数(kg/m^2)	0.94	0.80~1.10	0.438
腓总神经硬度(kPa)	0.91	0.89~0.95	<0.001
胫神经硬度(kPa)	0.93	0.89~0.97	0.002
腓总神经横截面积(mm^2)	0.75	0.58~0.96	0.022
胫神经横截面积(mm^2)	1.24	0.98~1.57	0.073

注: DPN 为糖尿病周围神经病变

在 2 组患者中, 腓总神经硬度诊断 DPN 的 AUC 最大, 在最佳截断值下, 腓总神经硬度的敏感度最

高。见图 2、表 5。

2.5 DPN 患者腓总神经横截面积和硬度与 TCSS 评分的相关性

在 DPN 组患者中, 腓总神经硬度、腓总神经横截面积均与 TCSS 评分呈显著正相关($P<0.05$), 见图 3。

3 讨论

本研究显示, DPN 组患者糖尿病病程、糖化血红蛋白水平及 TCSS 评分均显著高于非 DPN 组, 提示长期糖代谢异常仍是 DPN 发生和进展的重要临床背景, 与既往关于高血糖、氧化应激和微血管损伤参与 DPN 病理过程的认识一致。因此, 在影像学筛查之外, 糖代谢控制仍应作为 DPN 风险评估和干预的基础^[1-3]。

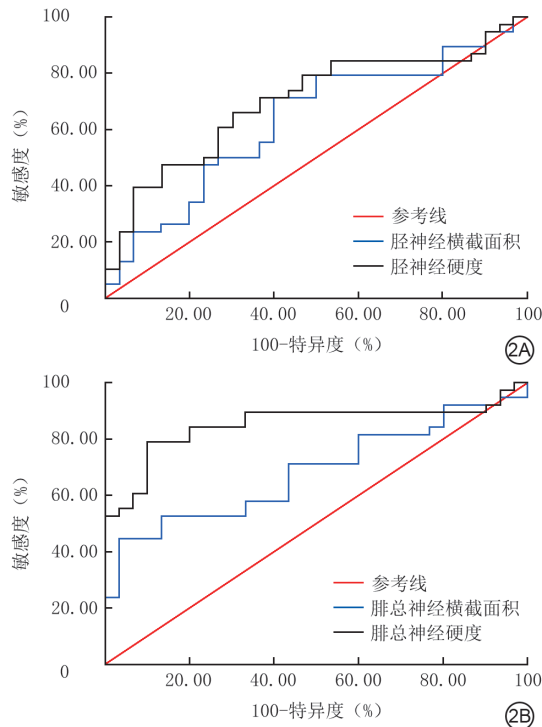
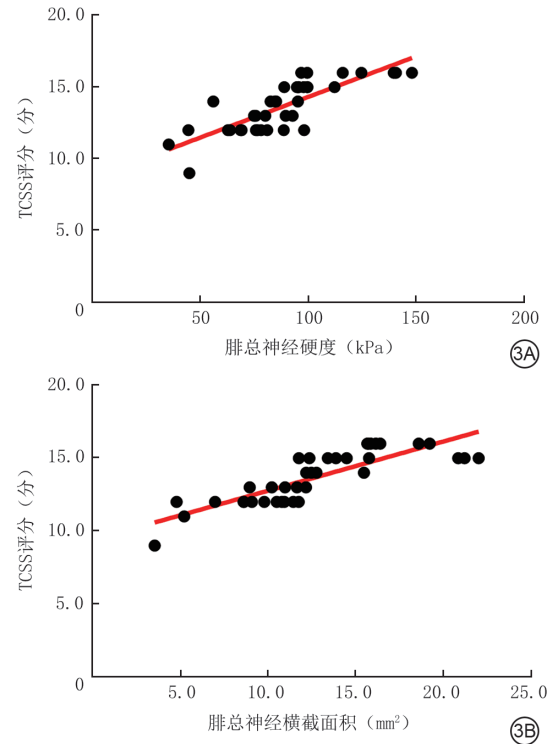


图2 胫神经与腓总神经的横截面积与硬度诊断68例2型糖尿病患者并发糖尿病周围神经病变的受试者操作特征曲线。2A.胫神经;2B.腓总神经

Figure 2 Receiver operating characteristic curves in diagnosing the complication of diabetic peripheral neuropathy in 68 patients with type 2 diabetes mellitus using the cross-sectional areas and stiffness of the tibial and common peroneal nerves

从影像学结果来看,DPN组患者腓总神经与胫神经的横截面积及硬度显著高于非DPN组患者和健康对照组志愿者,提示这2项参数可反映周围神经的结构与力学变化。多因素有序 logistic 回归分析进一步显示,腓总神经硬度、腓总神经横截面积及胫神经硬度均是DPN发病的独立危险因素。腓总神经横截面积增大可能反映高血糖相关的神经水肿、神经束膜增厚、结缔组织增生及微结构重塑,而神经硬度升高则可能进一步反映胶原沉积和纤维化所导致的力学性质改变^[4-8]。因此,腓总神经横



注:TCSS为多伦多临床评分系统

图3 38例并发糖尿病周围神经病变的2型糖尿病患者腓总神经硬度和横截面积与TCSS评分的相关性。3A.腓总神经硬度与TCSS评分呈显著正相关, $r_s=0.83, P<0.001$;3B.腓总神经横截面积与TCSS评分呈显著正相关, $r_s=0.89, P<0.001$

Figure 3 Correlations of common peroneal nerve stiffness and cross-sectional area with Toronto clinical scoring system scores in 38 patients with type 2 diabetes mellitus complicated with diabetic peripheral neuropathy

截面积与神经硬度并非单纯的伴随性影像表现,而可能从不同维度反映DPN相关的病理改变。

诊断价值分析显示,SWE测量的腓总神经硬度对DPN的诊断价值最大,表明SWE在2型糖尿病患者DPN诊断中具有较大的应用潜力,提示腓总神经硬度可能是反映DPN相关神经力学变化的较敏感指标,其机制或与腓总神经解剖位置浅表、走行于狭窄骨性通道、易受“双重卡压”机制影响密切相

表5 腓总神经与胫神经横截面积与硬度对68例2型糖尿病患者并发糖尿病周围神经病变的诊断价值比较

Table 5 Comparison of the diagnostic value of the cross-sectional area and stiffness of the common peroneal and tibial nerves for complication of diabetic peripheral neuropathy in 68 patients with type 2 diabetes mellitus

指标	AUC	95%CI	最佳截断值	约登指数	敏感度(%)	特异度(%)
腓总神经硬度	0.85	0.74~0.92	75.29	0.66	76.32	90.00
腓总神经横截面积	0.70	0.58~0.81	15.00	0.41	44.74	96.67
胫神经硬度	0.69	0.57~0.80	51.22	0.36	65.79	70.00
胫神经横截面积	0.63	0.51~0.75	10.50	0.28	68.42	60.00

注:硬度、横截面积的最佳截断值单位分别为kPa、mm²

关。Upton 和 McComas^[26]在 1973 年首次描述了“双重卡压”现象:一方面,高血糖状态下,活性醛糖还原酶介导的多元醇通路被激活,导致山梨醇积聚、还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸耗竭和钠钾 ATP 酶功能障碍,进而引发神经细胞渗透压升高、水肿^[13-14];另一方面,慢性高血糖还导致轴质运输受限,影响神经所需营养物质的输送^[15]。上述代谢紊乱使神经处于“第一重卡压”状态,增加其对外部机械性压迫的易感性。当肿胀的腓总神经穿行于膝外侧骨性狭窄区(“第二重卡压”)时,进一步诱发缺血、脱髓鞘等病理改变。长期“卡压”状态下,神经组织会发生胶原纤维沉积和 Fb 增殖,形成“神经瘢痕”,使神经硬度升高^[27-32]。此外,本研究显示腓总神经硬度和腓总神经横截面积均与 TCSS 评分呈显著正相关,提示二者均可随 DPN 临床严重程度增加而升高。既往高分辨率超声研究亦显示,DPN 患者周围神经横截面积增大,可能与神经水肿及结构重塑有关^[19-22]。因此,SWE 测量的腓总神经硬度和二维超声测量的腓总神经横截面积可分别从力学特性和形态学改变 2 个方面反映 DPN 的病变严重程度。

近年来随着影像学技术的发展,周围神经影像学评估已由传统的形态结构显示逐步拓展至神经微结构完整性及功能状态的定量分析。Jende 等^[33]通过磁共振扩散张量成像检测显示,糖尿病及糖尿病前期患者手功能较健康人下降的同时伴有磁共振扩散张量成像参数的异常,糖尿病及糖尿病前期患者的手功能下降与神经成像参数(如表观扩散系数、各向异性分数)异常密切相关,提示神经损伤可在临床症状出现前发生^[34-36]。本研究亦显示,尚未发生 DPN 的糖尿病患者的腓总神经硬度明显高于健康对照志愿者,提示该指标具备检测亚临床神经病变的潜力^[31-36]。相比于超声,MRI 可提供周围神经三维结构信息,直观显示神经沿程的多灶性水肿、增粗及信号改变,有助于评估病变范围和严重程度。磁共振扩散张量成像还可进一步获得表观扩散系数和各向异性分数等参数,用于量化 DPN 患者周围神经微结构损伤。这些扩散参数的异常与神经电生理检查结果及临床严重程度密切相关,且对 DPN 患者具有良好的诊断性能,但 MRI 检测成本高、时间长且参数与阈值尚未统一,因此目前多通过病变结构与多种功能参数进行 DPN 的病理机制研究。而 SWE 作为一种经济便捷、床旁可及的影像

学工具,可用于糖尿病高风险人群的筛查,识别亚临床阶段的神经病变。其次,SWE 测量的腓总神经硬度与 TCSS 评分具有较好的相关性,且检查可重复性良好,有望用于 DPN 严重程度的量化评估和病情动态监测。未来还可通过比较治疗前后神经硬度的变化,探索 SWE 在药物治疗或康复干预疗效评价中的应用价值。因此,SWE 有望在 DPN 的个体化管理、早期识别及治疗响应评估中发挥辅助决策作用^[37]。

尽管本研究结果具有一定的临床参考价值,但仍存在以下局限:首先,样本量较小,属于单中心探索性研究,可能影响结果的外部推广性;其次,本研究仅评估了胫神经和腓总神经,未全面覆盖 DPN 常累及的多条神经;第三,虽已观察到神经硬度与临床评分的相关性,但未进一步构建预测模型或评估其在不同 DPN 分期中的表现。因此,未来研究应基于本研究的参数,结合样本量估算,设计多中心、大样本的前瞻性随机对照研究,并探索 SWE 测量的神经硬度与其他神经功能指标的整合诊断模式,以进一步提升 SWE 的临床应用价值。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 张演基、唐铭远、简扬:数据采集、整理和论文撰写;吴秀平:超声检查、影像资料采集和数据解释;马礼鸿、蔡思浪:参与病例资料整理和随访信息核对;邓呈亮、魏在荣:经费支持、论文审阅、研究指导

参考文献

- [1] Savelieff MG, Elafros MA, Viswanathan V, et al. The global and regional burden of diabetic peripheral neuropathy[J]. *Nat Rev Neurol*, 2025, 21(1): 17-31. DOI: 10.1038/s41582-024-01041-y.
- [2] Dillon BR, Ang L, Pop-Busui R. Spectrum of diabetic neuropathy: new insights in diagnosis and treatment[J]. *Annu Rev Med*, 2024, 75: 293-306. DOI: 10.1146/annurev-med-043021-033114.
- [3] 李震寒, 陈中沛, 余晓霞. 糖尿病周围神经病变诊断和治疗的研究进展[J]. *重庆医科大学学报*, 2025, 50(5): 574-578. DOI: 10.13406/j.cnki.cyxb.003772.
- [4] 中国老年医学学会烧伤分会, 中华医学会烧伤外科学分会, 中国医师协会创面修复专业委员会. 糖尿病足溃疡合并下肢血管病变的外科诊疗全国专家共识(2024 版)[J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2024, 40(3): 206-220. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20231122-00202.
- [5] 王欣, 王银煜, 戚建武. 糖尿病足溃疡创面的发病机制及治疗的研究[J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2025, 41(10): 928-936. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20250124-00039.
- [6] Wang R, Li B, Dong M, et al. Targeting oxidative damage in diabetic foot ulcers: integrative strategies involving antioxidant drugs and nanotechnologies[J/OL]. *Burns Trauma*, 2025, 13: tkaf020[2026-01-30]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40718700/>. DOI: 10.1093/burnst/tkaf020.
- [7] Zhao S, Hu X, Zhao Y, et al. Hydrogel-based therapies for

- diabetic foot ulcers: recent developments and clinical implications[J/OL]. Burns Trauma, 2025, 13: tkae084[2026-01-30]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39917278/>.DOI:10.1093/burnst/tkae084.
- [8] Guo L, Xiao D, Xing H, et al. Engineered exosomes as a prospective therapy for diabetic foot ulcers[J/OL]. Burns Trauma, 2024, 12: tkae023[2026-01-30]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39026930/>.DOI:10.1093/burnst/tkae023.
- [9] 王金海,蒋凯,韩培,等.依帕司他联合羟苯磺酸钙治疗糖尿病周围神经病变的效果及其对氧化应激反应的影响[J].中华内分泌外科杂志,2023,17(3):332-336.DOI:10.3760/cma.j.cn.115807-20221107-00310.
- [10] Bril V, Perkins BA. Validation of the Toronto Clinical Scoring System for diabetic polyneuropathy[J]. Diabetes Care, 2002, 25(11):2048-2052.DOI:10.2337/diacare.25.11.2048.
- [11] England JD, Gronseth GS, Franklin G, et al. Distal symmetric polyneuropathy: a definition for clinical research: report of the American Academy of Neurology, the American Association of Electrodiagnostic Medicine, and the American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation [J]. Neurology, 2005, 64(2): 199-207. DOI: 10.1212/01.WNL.0000149522.32823.EA.
- [12] Galiero R, Caturano A, Vetrano E, et al. Peripheral neuropathy in diabetes mellitus: pathogenetic mechanisms and diagnostic options[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(4): 3554. DOI: 10.3390/ijms24043554.
- [13] Zhu J, Hu Z, Luo Y, et al. Diabetic peripheral neuropathy: pathogenetic mechanisms and treatment[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1265372. DOI: 10.3389/fendo.2023.1265372.
- [14] Takeshita Y, Sato R, Kanda T. Blood-nerve barrier (BNB) pathology in diabetic peripheral neuropathy and in vitro human BNB model[J]. Int J Mol Sci, 2020, 22(1): 62. DOI: 10.3390/ijms22010062.
- [15] Baptista FI, Pinheiro H, Gomes CA, et al. Impairment of axonal transport in diabetes: focus on the putative mechanisms underlying peripheral and central neuropathies[J]. Mol Neurobiol, 2019, 56(3): 2202-2210. DOI: 10.1007/s12035-018-1227-1.
- [16] Huang H, Wu S. Application of high-resolution ultrasound on diagnosing diabetic peripheral neuropathy[J]. Diabetes Metab Syndr Obes, 2021, 14: 139-152. DOI: 10.2147/DMSO.S292991.
- [17] Narayan S, Goel A, Singh AK, et al. High resolution ultrasonography of peripheral nerves in diabetic patients to evaluate nerve cross sectional area with clinical profile[J]. Br J Radiol, 2021, 94(1121):20200173.DOI:10.1259/bjr.20200173.
- [18] Goyal K, Aggarwal P, Gupta M. Ultrasound evaluation of peripheral nerves of the lower limb in diabetic peripheral neuropathy[J]. Eur J Radiol, 2021, 145:110058.DOI:10.1016/j.ejrad.2021.110058.
- [19] Senarai T, Pratipanawatr T, Yurasakpong L, et al. Cross-sectional area of the tibial nerve in diabetic peripheral neuropathy patients: a systematic review and meta-analysis of ultrasonography studies[J]. Medicina (Kaunas), 2022, 58(12): 1696. DOI: 10.3390/medicina58121696.
- [20] Jiang W, Huang S, Teng H, et al. Diagnostic performance of two-dimensional shear wave elastography for evaluating tibial nerve stiffness in patients with diabetic peripheral neuropathy[J]. Eur Radiol, 2019, 29(5): 2167-2174. DOI: 10.1007/s00330-018-5858-4.
- [21] He Y, Xiang X, Zhu BH, et al. Shear wave elastography evaluation of the median and tibial nerve in diabetic peripheral neuropathy[J]. Quant Imaging Med Surg, 2019, 9(2):273-282.DOI:10.21037/qims.2019.02.05.
- [22] Pradhan DR, Saxena S, Kant R, et al. Shear wave elastography of tibial nerve in patients with diabetic peripheral neuropathy-a cross-sectional study[J]. Skeletal Radiol, 2024, 53(3):547-554.DOI:10.1007/s00256-023-04448-8.
- [23] Tan S, Zhao S, Jin Z, et al. Feasibility of viscosity imaging and shear wave elastography for diagnosing diabetic peripheral neuropathy[J]. Korean J Radiol, 2025, 26(11):1075-1084.DOI:10.3348/kjr.2025.0690.
- [24] Peng RL, Jiang YF, Shen HL, et al. Diagnostic value of shear wave elastography for diabetic peripheral neuropathy: comparison between junior radiologists and senior radiologists[J]. BMC Med Imaging, 2025, 25(1): 512. DOI: 10.1186/s12880-025-02061-w.
- [25] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南 (2020 年版) [J]. 中华糖尿病杂志, 2021, 13(4):315-409.DOI:10.3760/cma.j.cn115791-20210221-00095.
- [26] Upton AR, McComas AJ. The double crush in nerve entrapment syndromes[J]. Lancet, 1973, 2(7825): 359-362. DOI:10.1016/s0140-6736(73)93196-6.
- [27] Lai ZH, She BY, Song ML, et al. Role of nerve ultrasound and shear wave elastography in stratified diagnosis of diabetic peripheral neuropathy[J]. Medicine (Baltimore), 2025, 104(45):e45492.DOI:10.1097/MD.00000000000045492.
- [28] Xia X, Dai L, Zhou H, et al. Assessment of peripheral neuropathy in type 2 diabetes by diffusion tensor imaging: a case-control study[J]. Eur J Radiol, 2021, 145: 110007. DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.110007.
- [29] Wang X, Luo L, Xing J, et al. Assessment of peripheral neuropathy in type 2 diabetes by diffusion tensor imaging [J]. Quant Imaging Med Surg, 2022, 12(1): 395-405. DOI: 10.21037/qims-21-126.
- [30] Yang Y, Zhao B, Wang Y, et al. Diabetic neuropathy: cutting-edge research and future directions[J]. Signal Transduct Target Ther, 2025, 10(1): 132. DOI: 10.1038/s41392-025-02175-1.
- [31] Carmichael J, Fadavi H, Ishibashi F, et al. Advances in screening, early diagnosis and accurate staging of diabetic neuropathy[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2021, 12: 671257.DOI:10.3389/fendo.2021.671257.
- [32] Erol K, Topaloğlu US, Göl MF. Frequency of carpal tunnel syndrome and hand dysfunction in prediabetes: a cross-sectional, controlled study[J]. Turk J Phys Med Rehabil, 2022, 68(1):62-69.DOI:10.5606/tftrd.2022.6828.
- [33] Jende J, Kender Z, Mooshage C, et al. Diffusion tensor imaging of the sciatic nerve as a surrogate marker for nerve functionality of the upper and lower limb in patients with diabetes and prediabetes[J]. Front Neurosci, 2021, 15:642589. DOI:10.3389/fnins.2021.642589.
- [34] Ziegler D, Papanas N, Schnell O, et al. Current concepts in the management of diabetic polyneuropathy[J]. J Diabetes Investig, 2021, 12(4):464-475.DOI:10.1111/jdi.13401.
- [35] Røikjer J, Mørch CD, Ejlskjær N. Diabetic peripheral neuropathy: diagnosis and treatment[J]. Curr Drug Saf, 2021, 16(1):2-16.DOI:10.2174/1574886315666200731173113.
- [36] Elafros MA, Andersen H, Bennett DL, et al. Towards prevention of diabetic peripheral neuropathy: clinical

presentation, pathogenesis, and new treatments[J]. *Lancet Neurol*, 2022, 21(10): 922-936. DOI: 10.1016/S1474-4422(22)00188-0.

[37] Atmaca A, Ketenci A, Sahin I, et al. Expert opinion on

screening, diagnosis and management of diabetic peripheral neuropathy: a multidisciplinary approach[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2024, 15: 1380929. DOI: 10.3389/fendo.2024.1380929.