

高频超声在糖尿病周围神经病变中的应用进展

唐超, 成涓*, 黄菊, 郑君

重庆医科大学附属第二医院超声科, 重庆

收稿日期: 2026年3月1日; 录用日期: 2026年3月24日; 发布日期: 2026年4月1日

摘要

糖尿病周围神经病变在糖尿病患者中的发病率约为三分之一, 目前主要诊断方式是病史、症状和/或体征, 金标准是神经传导检查, 但是患者早期症状往往不明显, 加之神经传导检查对细小神经不敏感, 这种疾病常常被漏诊。高频超声作为一种新型的神经检查方式, 对多种周围神经病变具有高敏感的诊断效能。本综述回顾了高频超声及衍生技术在糖尿病周围神经病变中的应用进展。

关键词

高频超声, 糖尿病, 周围神经病变

Advances in the Application of High-Frequency Ultrasound for Diabetic Peripheral Neuropathy

Chao Tang, Juan Cheng*, Ju Huang, Jun Zheng

Department of Ultrasound, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 1, 2026; accepted: March 24, 2026; published: April 1, 2026

Abstract

Diabetic peripheral neuropathy (DPN) is present in approximately one-third of diabetic patients. Current diagnosis primarily relies on medical history, clinical symptoms, and/or physical signs, with nerve conduction studies (NCS) established as the diagnostic gold standard. However, early DPN symptoms are often insidious, and NCS exhibits limited sensitivity for small-fiber neuropathy. Consequently, DPN is frequently underdiagnosed. Ultrasound has emerged as a valuable modality for musculoskeletal and nerve imaging, demonstrating high sensitivity in evaluating various peripheral neuropathies.

*通讯作者。

文章引用: 唐超, 成涓, 黄菊, 郑君. 高频超声在糖尿病周围神经病变中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 805-812. DOI: [10.12677/acm.2026.1641310](https://doi.org/10.12677/acm.2026.1641310)

This review summarizes recent advancements in the application of high-frequency ultrasound and its derived techniques in the assessment of DPN.

Keywords

High-Frequency Ultrasound, Diabetes, Peripheral Neuropathy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

由于生活方式变化和人口老龄化严重,糖尿病被公认为 21 世纪常见慢性流行病之一,糖尿病周围神经病变(Diabetic Peripheral Neuropathy, 简称 DPN)是糖尿病常见慢性并发症之一[1][2], 它是指排除其他周围神经病变,糖尿病患者出现与周围神经功能障碍相关的症状。DPN 的诊断主要依赖对患者病史的细致询问,以及全面详细的体格检查[3],金标准是神经传导检查(Nerve Conduction Studies, 简称 NCS) [4]。然而 NCS 中对异常神经纤维的评估,包括触本体感觉和运动功能,是 DPN 晚期的表现。相反,参与热反应、疼痛和自主神经功能的由无髓或薄髓鞘 C 和 A 构成的神经纤维 δ ,被认为在 DPN 中更早发生病变 [5]。目前治疗药物效果主要是缓解神经病变,这些药物在病变早期使用才有较高的收益[6],这种种原因导致亚临床状态和电生理正常的 DPN 患者失去最佳治疗时间。

鉴于这些挑战,超声和多种影像技术已被研究用于改善 DPN 的诊断现状。高频超声及其衍生技术作为一种新型的、方便快捷的神经检查技术已多次证明能有效检出 DPN [7]。二维灰阶超声成像、弹性成像、彩色多普勒血流成像(Color Doppler Flow Imaging, 简称 CDFI)与能量多普勒成像(Power Doppler Imaging, 简称 PDI)、超微血管成像(Superb Microvascular Imaging, 简称 SMI)和超声造影(Contrast-Enhanced Ultrasound, 简称 CEUS)等技术,能够详细评估周围神经形态特征、内部回声分布、弹性指数和血流灌注。本综述全面评估了高频超声及衍生技术在 DPN 诊断中的应用进展,讨论优劣势,并比较诊断价值。

2. 二维灰阶超声成像

二维灰阶超声成像可以评估神经的内部结构及形态特征,并且可以实时追踪神经走行上的变化。正常神经束在横切面上表现为小的低回声区域(与皮肤层相比),由高回声带分隔,呈现“筛网状”外观。低回声区域代表神经束,高回声分隔带代表神经束膜[8]。近年来关于高频超声评估 DPN 的研究已经确定了重要的形态学诊断指标:具有显著特异性和敏感性的超声图像特征有横截面积(Nerve Cross-sectional Area, 简称 CSA)增大、回声减低、最大厚度(Maximum Thickness, 简称 MT)增加伴有神经外膜增厚、筛网状结构消失。综合以往的研究,CSA、低回声比率(Hypoechoic Area, 简称 HA)、MT 诊断 DPN 具有相对较高的敏感性及特异性。下面将分别介绍各指标的优劣和潜在的诊断价值。

2.1. 横截面积(CSA)

DPN 患者的神经二维超声短轴图像特征是神经增粗、筛网结构消失。各种机制导致 Na^+/K^+ 泵的功能障碍,使得细胞内的 Na^+ 堆积,导致细胞水肿和脱髓鞘,这从病理生理学上解释了二维灰阶超声成像显示神经 CSA 增大的原因[9][10]。有研究发现,与对照组相比,DPN 患者神经的回声更低,形态更圆润、边界更模糊[10]。由于 DPN 具有远端对称性特点,下肢神经比上肢神经较先受累。在 Goyal K 等人对下肢

神经(胫神经、腓肠神经)的研究中,发现腓肠神经具有较高的灵敏度和曲线下面积[11]。说明腓肠神经在糖尿病周围神经病变发展中可能最易受累,可以作为 DPN 筛查的首选指标。Singh KP 等人发现,DPN 患者的多条神经在远端部位的 CSA 显著高于正常对照组[12],这表明 DPN 的发展先从远端开始并且累及多条神经,强调了在早期筛查 DPN 时对远端神经检查的重要性。一些研究[13][14]发现 DPN 组和非 DPN 组患者的 CSA、低回声面积、MT 均显著高于对照组,而 DPN 组与非 DPN 组患者之间的差异无统计学意义,由于非 DPN 组没有出现特征性症状,表明糖尿病患者在临床症状出现之前,外周神经的形态学特征已经发生了一定程度的改变,并且与疾病的严重程度呈显著正相关。

Goyal K 等人[11]还发现 NCS 异常的 DPN 患者其 CSA 显著高于 NCS 正常的 DPN 患者和对照组,NCS 正常的 DPN 患者其 CSA 显著高于对照组,这些研究说明糖尿病患者 CSA 显著高于正常人,而且在周围神经病变电生理变化出现之前,形态改变已经发生。这些研究强调了超声在不典型 DPN 患者中的诊断价值:在 NCS 不能诊断 DPN 或患者不伴有症状体征的情况下,超声成像存在形态变化时,提示神经病变已经发生,促使临床应尽早干预和治疗,以得到最佳的治疗效果。在 Singh KP 的研究中还发现腓肠神经的 CSA 与速度、潜伏期和增幅有较明显的负相关性,其中速度是最显著的参数[12],揭示了 CSA 的增大与脱髓鞘改变可能有关联。但是对 CSA 的测量大多研究都是通过人工手动勾勒出神经外膜计算得来,具有明显的测量误差。在 Ishibashi 的研究中[13]使用 Photoshop 软件辅助勾勒出神经外膜来计算 CSA,明显降低了此类误差。在以后的研究中希望可以明确更完善准确的测量方法测量 CSA。

2.2. 低回声比率(HA)

由于神经细胞水肿,神经短轴横截面会出现低回声区域。黄等人[15]对糖尿病大鼠坐骨神经的研究中发现:① 神经病理证实了糖尿病大鼠神经的含水量增加;② 大鼠在长时间高血糖的影响下神经强度会增加,并且与电生理呈负相关。用病理结果解释神经的回声变化可能与纤维胶原蛋白的水分含量或均匀基质有关。Watanabe 等人开创性地将神经短轴整个区域的平均回声强度作为阈值,低于阈值的区域占整个神经短轴区域的比率定义为 HA [14]。他们发现 HA 与 NCS 存在相关性,具体来说,他们发现低传导速度组的 HA 比高传导速度组显著增加,且 HA 与传导速度存在显著负相关($r = -0.62; P < 0.001$)。Ishibashi 等人的研究将 DPN 患者根据病变严重程度分为四个亚组与对照组比较 HA [13],结果显示病变程度严重的亚组高于病变程度轻微的亚组和对照组,提示 HA 与病变严重程度呈正相关,且与电生理呈负相关,表明 HA 具有早期诊断 DPN 的价值,并给临床提供治疗和复查的依据。但 Ishibashi 等人将低回声定义为低于平均回声强度的 70%,才能得到与前诉结果相似的结论。由于 HA 的定义国际上没有统一的标准,在未来还需要更多创新的研究方法对 HA 进行合理的定义。

2.3. 最大厚度(MT)

近期关于高频超声评估 DPN 的研究还确定了 MT 诊断 DPN 的诊断潜能。Wang 等人强调胫神经厚度作为 DPN 诊断指标的重要性[16]。他们发现胫神经 $MT > 3.6 \text{ mm}$ 预测 DPN 的敏感性和特异性分别为 81.8%和 90.9%;MT 比 CSA 具有更高的诊断效能(MT 诊断界值为 3.6 mm 的曲线下面积为 0.86,高于 CSA 的 0.74)。Ishibashi 等人发现 MT 与病变严重程度存在正相关,与 NCS 存在负相关[13]。但是 MT 依赖人工选择神经最宽处后在垂直方向测量,十分容易受到操作者的主观影响,因此需要明确更合理的测量方式。

此外,一些超声评分系统(主要有波鸿超声评分和超声模式总分(Ultrasound Pattern Sum Score,简称 UPSS))通过评估神经形态学参数提供相对客观的评分。波鸿超声评分主要用于区分急性(AIDP)与慢性炎症性脱髓鞘多发性神经病(CIDP),它是通过测量特定神经(腕尺管尺神经、上臂尺神经、螺旋沟内的桡神

经、腓肠肌外侧头与内侧头之间的腓肠神经)的 CSA 进行评分, 每个部位 CSA 增大时加一分。研究人员确定 CIDP 的诊断界值为 2 分, 敏感性 90%, 特异性 90.4% [17]。DPN 和 AIDP 及 CIDP 均是周围神经病变, 神经病理均有脱髓鞘改变, 超声形态学改变均表现为 CSA 增大, 确定 DPN 靶向神经后, 可以参考波鸿评分建立针对 DPN 的评分系统。UPSS 包含三个子评分系统: UPS-A 用于感觉运动神经, UPS-B 用于颈根和迷走神经, UPS-C 用于腓浅神经[17][18]。具体评分细则见表 1。Heiling B 等人发现 UPSS 评分系统不仅可以区分 AIDP 和 CIDP, 还可以帮助区分 CIDP 和 DPN [19]。他们观察到 CIDP 神经显著增大, UPSS 通常超过 5 分, 相比之下, DPN 患者通常表现出神经轻微增大, 尤其是在受压部位, 总分通常小于 3 分。最近, 基于 UPSS 子评分 UPS-A, 建立了一种新型超声评分系统——DCEC 评分系统, 具体评分细则见表 2。吴香花等人发现 DCEC 评分系统对 DPN 具有良好的诊断价值[20]。具体来说, 14.5 分作为手臂和腿部周围神经的诊断界值诊断 DPN 的敏感性为 81%, 特异性为 80%。黄海伦等人研究得出 DCEC 的诊断界值为 12.5, 其中清晰度的截止值为 10.5 [21], 特异性 89.5%, 表明神经清晰度更能评价神经损伤。但是他们研究中的亚临床 DPN 组和非 DPN 组样本量过少, 还需要进行多样本、多中心队列的研究, 探讨 DCEC 评分系统的诊断价值。

Table 1. UPSS scoring system

表 1. UPSS 评分系统

评分系统	测量神经	测量部位	评分
USP-A	正中神经 CSA*	上臂、肘部、前臂中部	<150% 定义高值: 1 分 ≥150% 定义高值: 2 分
	尺神经 CSA	上臂、前臂中部	同上
	胫神经 CSA	胭窝、脚踝	同上
	腓总神经 CSA	胭窝	同上
UPS-B	颈 5、6 颈神经直径	出椎间孔和横突处	增大: 1 分
	迷走神经 CSA	颈动脉鞘	增粗: 1 分
UPS-C	腓浅神经 CSA	小腿	增粗: 1 分

*CSA: 横截面积。

Table 2. DCEC scoring system

表 2. DCEC 评分系统

评价项目	神经表现描述	评分
清晰度	清晰	0
	轻度模糊	1
	模糊	2
	不清晰	3
横截面积	正常	0
	≥正常值, 但≤正常值的 1.5 倍	1
	>正常值的 1.5 倍	2
回声	正常	0
	增高或减低	1
卡压	无	0
	有	1

3. 弹性成像

之前表述的机制导致细胞水肿可以引起神经硬度增加；另外，肥胖和胰岛素抵抗导致代谢和炎症作用的自我强化级联反应，引发下游级联反应，引起各种促炎介质的释放最终导致神经的炎症反应，引起硬度增加[22]。Liu F 等人在动物实验中发现糖尿病大鼠坐骨神经的僵硬度显著高于对照组[23]，并且还与神经传导速度存在联系，还从组织学上证实了糖尿病神经硬度增加[23]。超声弹性成像，包括应变弹性成像(Strain Elastic, 简称 SE)和剪切波弹性成像(Shear Wave Elastography, 简称 SWE)。SE 通过测量施加外部压力前后组织形态的变化绘制颜色弹性编码图来定性评估组织弹性。SWE 通过评估特定组织中剪切波的传播速度来绘制组织的弹性特性，定量分析出组织的弹性刚度，可用于反映病变严重程度。两项技术在不同研究者之间表现出显著一致性。ZHENG S 等人发现无论使用 SE 还是 SWE 评估神经硬度，结果均显示 DPN 患者的神经硬度显著高于非 DPN 组和对照组，但是 SWE 的曲线下面积显著高于 SE [24]。这一结果可能是 SWE 测量剪切波在组织中的传播速度直接评估硬度，相比之下，SE 容易受到观察者在操作过程中施加压力的影响。

SWE 可以作为一种诊断 DPN 的高潜能、有效定量工具。在一项萃取分析中[25]，结果分析得出通过 SWE 测量 DPN 的胫神经硬度具有良好的诊断性能，敏感性和特异性分别为 80% 和 86%，曲线下面积为 0.90。Tan S 等人的研究表明 DPN 患者的胫神经硬度显著高于对照组[26]。Ishibashi 等人发现，DPN 组的剪切横波速度明显高于非 DPN 组和对照组，非 DPN 组的剪切横波速度显著高于对照组，这表明糖尿病患者周围神经硬度的变化比临床症状出现早，此外，还发现 NCS 正常的 DPN 患者神经硬度比对照组显著增加，这表明尽管 DPN 患者 NCS 正常，但神经可能已经受到损伤，神经硬度改变较电生理改变更早。另外，穆晶晶等人发现 SWE 在检出 DPN 患者胫神经病变的敏感性和曲线下面积高于 CSA [27]，表明 SWE 在 DPN 早期筛查和亚临床患者诊断中具有重要作用。但是对腓总神经的研究结果却是与之相反，分析可能是腓总神经走行表浅且迂曲，探头施加的压力影响了测量结果。这需要未来更多的研究明确测量位点及方式的最佳取值。

4. 多普勒血流成像

传统多普勒血流成像(CDFI 和 PDI)可以检测出 DPN 患者神经中的血流，这与 DPN 早期神经因炎症导致的血管反应性增强有关[28]。这种血管反应性导致神经束膜和神经周围血流增加。在谭珠信的动物实验研究中观察到糖尿病组大鼠趾末端血液灌注显著低于对照组，表明糖尿病会影响远端组织微循环。在 Borire 等人[29]的研究中，糖尿病患者神经的最大灌注强度(使用灌注测量软件量化能量多普勒超声图像得到的参数)显著高于对照组。此外，该研究将糖尿病患者根据神经病变程度进行了分组，发现最大灌注强度与神经病变程度呈现出显著的正相关。但是传统多普勒超声需要使用滤波器去除杂波和运动伪影，这意味着会丧失对神经内细小血管的可见性。

5. 超微血管成像

SMI 是一种超微血管成像技术，采用先进的多普勒算法去除组织运动信号，可以检测到组织内低速血流信号[30] [31]，灵敏反映微血管。SMI 已被用于研究腕管综合征的血流变化，观察到使用 SMI 获得的单色血流图像与神经病变严重程度存在显著相关性，并且血流的显示率显著高于 PDI 和 CDFI。相比传统多普勒成像，SMI 对神经血管方面评估更为敏感。此外，还发现 SMI 与 CSA 之间也存在显著的相关性[32]。若干研究显示[33] [34]，糖尿病患者使用血管活性药物(如血管紧张素转换酶抑制剂)后，神经内血流和电生理测值显著改善，这些结果暗示了血管因素可能是影响 DPN 发展的主要原因之一。并且还有研究发现聚焦超声可以通过增加局部组织的血液灌注改善糖尿病神经病变[35]。因此，通过 SMI 测量血

管指数(在感兴趣区内检测到的血管像素点占总像素点的百分比)定量分析神经内的血流情况, 客观评价神经病变情况, 可能是 DPN 潜在的诊断指标。

6. 超声造影成像

CEUS 通过外周血管注射超声造影剂进行成像, 可以反映组织微循环的灌注情况。已有动物实验证实 CEUS 可以定量评估糖尿病新西兰兔坐骨神经血流灌注情况[36], 并且定量分析发现神经内灌注指数高于周围肌肉。由于糖尿病患者肌肉的血流灌注会减少[37], 那么使用 CEUS 比较周围神经与周围肌肉的血流灌注情况可能对 DPN 诊断提供有价值的信息。鉴于 CEUS 属于有创且成本高的检查, 在疾病筛查方面存在接受率低的局限性。

7. 总结与展望

综上所述, 高频超声及其衍生技术对 DPN 诊断具有巨大的潜能, 加之超声具有无创性和重复性高的优势, 在 DPN 早期诊断及追踪病变进展情况中具有广泛前景。由于超声形态学改变先于电生理改变及临床症状, 高频超声对 DPN 亚临床状态有一定的诊断价值[38]。但是各技术均存在一定的缺陷, 可以将多种技术结合起来综合评估神经病变情况, 提高超声对 DPN 的诊断价值。DPN 是一种弥漫性多发性神经病变, 累积全身多个部位, 并且神经病变情况多样, 加之 DPN 的超声图像尚无统一的阅读标准, 评估结果容易受到操作者主观因素的影响。未来可整合多种超声技术, 对 DPN 患者多部位周围神经进行系统性评估, 旨在明确最易受累的神经节段, 并筛选具有高特征性的超声参数, 以优化 DPN 的早期诊断与病情监测; 未来的研究方向可着眼于构建一套完善的超声综合评分系统, 整合二维灰阶超声、弹性成像、超微血管成像及超声造影等多种模态的评估指标, 以实现 DPN 严重程度的多维度、客观化评估。后续通过开展多中心、前瞻性临床研究对该评分模型进行系统性验证, 有望显著提升 DPN 早期诊断的效能, 从而为患者争取及时有效的干预时机。

基金项目

国家自然科学基金(82402285), 国家自然科学基金(82502369), 重庆医科大学附属第二医院登峰学科群联合项目(2024207)。

参考文献

- [1] Sun, H., Saedi, P., Karuranga, S., Pinkepank, M., Ogurtsova, K., Duncan, B.B., *et al.* (2022) IDF Diabetes Atlas: Global, Regional and Country-Level Diabetes Prevalence Estimates for 2021 and Projections for 2045. *Diabetes Research and Clinical Practice*, **183**, Article ID: 109119. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2021.109119>
- [2] Pop-Busui, R., Boulton, A.J.M., Feldman, E.L., Bril, V., Freeman, R., Malik, R.A., *et al.* (2017) Diabetic Neuropathy: A Position Statement by the American Diabetes Association. *Diabetes Care*, **40**, 136-154. <https://doi.org/10.2337/dc16-2042>
- [3] (2023) Corrigendum regarding American Association of Clinical Endocrinology Clinical Practice Guideline: Developing a Diabetes Mellitus Comprehensive Care Plan—2022 Update. *Endocrine Practice*, **29**, 80-81.
- [4] Dunker, Ø., Uglem, M., Bu Kvaløy, M., Løseth, S., Hjelland, I.E., Allen, S.M., *et al.* (2023) Diagnostic Accuracy of the 5.07 Monofilament Test for Diabetes Polyneuropathy: Influence of Age, Sex, Neuropathic Pain and Neuropathy Severity. *BMJ Open Diabetes Research & Care*, **11**, e003545. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2023-003545>
- [5] Boulton, A.J.M., Vinik, A.I., Arezzo, J.C., Bril, V., Feldman, E.L., Freeman, R., *et al.* (2005) Diabetic Neuropathies: A Statement by the American Diabetes Association. *Diabetes Care*, **28**, 956-962. <https://doi.org/10.2337/diacare.28.4.956>
- [6] Yang, Y., Zhao, B., Wang, Y., Lan, H., Liu, X., Hu, Y., *et al.* (2025) Diabetic Neuropathy: Cutting-Edge Research and Future Directions. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, **10**, Article No. 132. <https://doi.org/10.1038/s41392-025-02175-1>
- [7] Jiang, Y., Liu, X. and Jiang, Z. (2024) From Morphology to Therapeutic Strategies: Exploring New Applications of

- Ultrasound for Diabetic Peripheral Neuropathy Diagnosis and Management. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **43**, 2231-2245. <https://doi.org/10.1002/jum.16573>
- [8] Narayan, S., et al. (2021) High Resolution Ultrasonography of Peripheral Nerves in Diabetic Patients to Evaluate Nerve Cross Sectional Area with Clinical Profile. *British Journal of Radiology*, **94**, Article ID: 20200173.
- [9] Feldman, E.L., Nave, K., Jensen, T.S. and Bennett, D.L.H. (2017) New Horizons in Diabetic Neuropathy: Mechanisms, Bioenergetics, and Pain. *Neuron*, **93**, 1296-1313. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.02.005>
- [10] Eid, S.A., Rumora, A.E., Beirowski, B., Bennett, D.L., Hur, J., Savelieff, M.G., et al. (2023) New Perspectives in Diabetic Neuropathy. *Neuron*, **111**, 2623-2641. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.05.003>
- [11] Goyal, K., Aggarwal, P. and Gupta, M. (2021) Ultrasound Evaluation of Peripheral Nerves of the Lower Limb in Diabetic Peripheral Neuropathy. *European Journal of Radiology*, **145**, Article ID: 110058. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.110058>
- [12] Singh, K.P., Gupta, K., Kataria, N., Arora, V. and Nagpal, N. (2020) High-Resolution Ultrasonography of the Sural Nerve in Diabetic Peripheral Neuropathy. *Journal of Ultrasonography*, **20**, e83-e89. <https://doi.org/10.15557/jou.2020.0013>
- [13] Ishibashi, F., Taniguchi, M., Kojima, R., Kawasaki, A., Kosaka, A. and Uetake, H. (2015) Morphological Changes of the Peripheral Nerves Evaluated by High-resolution Ultrasonography Are Associated with the Severity of Diabetic Neuropathy, but Not Corneal Nerve Fiber Pathology in Patients with Type 2 Diabetes. *Journal of Diabetes Investigation*, **6**, 334-342. <https://doi.org/10.1111/jdi.12299>
- [14] Watanabe, T., Ito, H., Sekine, A., Katano, Y., Nishimura, T., Kato, Y., et al. (2010) Sonographic Evaluation of the Peripheral Nerve in Diabetic Patients. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **29**, 697-708. <https://doi.org/10.7863/jum.2010.29.5.697>
- [15] Huang, Y., Hu, B. and Zhu, J. (2016) Study on the Use of Quantitative Ultrasound Evaluation of Diabetic Neuropathy in the Rat Sciatic Nerve. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, **39**, 997-1005. <https://doi.org/10.1007/s13246-016-0448-8>
- [16] Wang, K., Yu, D., Yao, T., Zhang, S., Wen, L. and Gu, C. (2021) Retrospective Study of the Ultrasound Characteristics of the Tibial Nerve in Patients with Type 2 Diabetic Peripheral Neuropathy. *Annals of Palliative Medicine*, **10**, 8787-8796. <https://doi.org/10.21037/apm-21-1573>
- [17] Kerasnoudis, A., Pitarokoili, K., Behrendt, V., Gold, R. and Yoon, M.S. (2014) Nerve Ultrasound Score in Distinguishing Chronic from Acute Inflammatory Demyelinating Polyneuropathy. *Clinical Neurophysiology*, **125**, 635-641. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.08.014>
- [18] Tan, C., Yahya, M.A., Goh, K. and Shahrizaila, N. (2023) Nerve Ultrasound Score in Chronic Inflammatory Demyelinating Polyneuropathy. *Medicina*, **59**, Article 747. <https://doi.org/10.3390/medicina59040747>
- [19] Heiling, B., Kneer, K., He, W., Lehmann, T., Müller, N., Kloos, C., et al. (2024) Nerve Ultrasound Helps to Distinguish CIDP Patients with Diabetes from Patients with Diabetic Polyneuropathy. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 30504. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82235-8>
- [20] 吴香花, 欧阳倩, 罗芳, 等. DCEC 超声评分评估不对称性神经病理性疼痛[J]. 中国医学影像学杂志, 2019, 27(4): 292-297.
- [21] Huang, H., Tang, C., Li, M., Huang, J., Li, Y. and Wu, S. (2022) Sensitivity and Specificity of High Frequency Ultrasound Score (DCEC) in Diabetic Peripheral Neuropathy. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, **21**, 1459-1467. <https://doi.org/10.1007/s40200-022-01080-6>
- [22] Yang, K., Wang, Y., Li, Y., Chen, Y., Xing, N., Lin, H., et al. (2022) Progress in the Treatment of Diabetic Peripheral Neuropathy. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **148**, Article ID: 112717. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112717>
- [23] Liu, F., Li, D., Xin, Y., Liu, F., Li, W. and Zhu, J. (2022) Quantification of Nerve Viscosity Using Shear Wave Dispersion Imaging in Diabetic Rats: A Novel Technique for Evaluating Diabetic Neuropathy. *Korean Journal of Radiology*, **23**, 237-245. <https://doi.org/10.3348/kjr.2021.0603>
- [24] Zheng, S., Zhu, M., Fan, G., Yang, X. and Bai, M. (2025) Application Value of Strain Elastography and Shear Wave Elastography in Patients with Type 2 Diabetic Peripheral Neuropathy: A Prospective Observational Study. *British Journal of Radiology*, **98**, 280-286. <https://doi.org/10.1093/bjr/tqae227>
- [25] Dong, B., Lyu, G., Yang, X., Wang, H. and Chen, Y. (2022) Shear Wave Elastography as a Quantitative Biomarker of Diabetic Peripheral Neuropathy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Public Health*, **10**, Article 915883. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.915883>
- [26] Tan, S., Zhao, S., Jin, Z., Yao, J., Wang, W., Li, C., et al. (2025) Feasibility of Viscosity Imaging and Shear Wave Elastography for Diagnosing Diabetic Peripheral Neuropathy. *Korean Journal of Radiology*, **26**, 1075-1084. <https://doi.org/10.3348/kjr.2025.0690>

- [27] 穆晶晶, 田臻, 吴成蓉, 等. 高频超声及剪切波弹性成像技术对 2 型糖尿病下肢神经病变的定量评估[J]. 中国临床医学影像杂志, 2023, 34(7): 512-516.
- [28] Chen, S., Li, R., Hong, J., Ye, T. and Zhu, H. (2025) Association between Intraneural Blood Flow of the Sciatic Nerve, Peripheral Neuropathies, and Foot Ulcers in Patients with Diabetes. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **15**, 6234-6251. <https://doi.org/10.21037/qims-2024-2773>
- [29] Borire, A.A., Visser, L.H., Padua, L., Colebatch, J.G., Huynh, W., Simon, N.G., *et al.* (2017) Utility of Maximum Perfusion Intensity as an Ultrasonographic Marker of Intraneural Blood Flow. *Muscle & Nerve*, **55**, 77-83. <https://doi.org/10.1002/mus.25200>
- [30] Chen, J., Chen, L., Wu, L., Wang, R., Liu, J., Hu, B., *et al.* (2017) Value of Superb Microvascular Imaging Ultrasonography in the Diagnosis of Carpal Tunnel Syndrome: Compared with Color Doppler and Power Doppler. *Medicine*, **96**, e6862. <https://doi.org/10.1097/md.0000000000006862>
- [31] Endo, T., Matsui, Y., Kawamura, D., Urita, A., Momma, D., Ota, M., *et al.* (2022) Diagnostic Utility of Superb Microvascular Imaging and Power Doppler Ultrasonography for Visualizing Enriched Microvascular Flow in Patients with Carpal Tunnel Syndrome. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 832569. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.832569>
- [32] Lin, T., Shen, P., Chang, K., Wu, W. and Özçakar, L. (2024) Assessment of the Carpal Tunnel and Associated Neural Structures with Superb Microvascular Imaging: A Scoping Review. *Expert Review of Medical Devices*, **21**, 141-147. <https://doi.org/10.1080/17434440.2023.2285856>
- [33] Motawi, T.K., Rizk, S.M., Ibrahim, I.A. and El-Emady, Y.F. (2014) Alterations in Circulating Angiogenic and Anti-angiogenic Factors in Type 2 Diabetic Patients with Neuropathy. *Cell Biochemistry and Function*, **32**, 155-163. <https://doi.org/10.1002/cbf.2987>
- [34] Lin, Q., Li, K., Chen, Y., Xie, J., Wu, C., Cui, C., *et al.* (2023) Oxidative Stress in Diabetic Peripheral Neuropathy: Pathway and Mechanism-Based Treatment. *Molecular Neurobiology*, **60**, 4574-4594. <https://doi.org/10.1007/s12035-023-03342-7>
- [35] Tan, J., Lin, C. and Chen, G. (2020) Vasomodulation of Peripheral Blood Flow by Focused Ultrasound Potentiates Improvement of Diabetic Neuropathy. *BMJ Open Diabetes Research & Care*, **8**, e001004. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2019-001004>
- [36] Jiang, Z., Huang, Y., Shen, H. and Liu, X. (2019) Clinical Applications of Superb Microvascular Imaging in the Liver, Breast, Thyroid, Skeletal Muscle, and Carotid Plaques. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **38**, 2811-2820. <https://doi.org/10.1002/jum.15008>
- [37] Mooshage, C.M., Tsilingiris, D., Schimpfle, L., Kender, Z., Aziz-Safaie, T., Hohmann, A., *et al.* (2023) Insulin Resistance Is Associated with Reduced Capillary Permeability of Thigh Muscles in Patients with Type 2 Diabetes. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, **109**, e137-e144. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgad481>
- [38] Tandon, A., Khullar, T., Maheshwari, S., Bhatt, S. and Narang, S. (2021) High Resolution Ultrasound in Subclinical Diabetic Neuropathy: A Potential Screening Tool. *Ultrasound*, **29**, 150-161. <https://doi.org/10.1177/1742271x20958034>