

腕管综合征影像学研究进展

张海峰, 冯波*, 占鸣, 朱翰林, 卢珩

杭州市第九医院放射科 浙江杭州

【摘要】腕管综合征 (Carpal tunnel syndrome, CTS) 作为常见的神经卡压性疾病, 对患者的生活质量产生显著影响。影像学技术在 CTS 的诊断、治疗及研究中发挥着关键作用。本文对 CTS 的流行病学、病理机制、影像技术 (超声、MRI 和 CT) 的应用进行全面阐述, 并对未来影像技术的潜在应用、多学科合作趋势及个性化与精准医疗方向进行了展望。

【关键词】腕管综合征; 超声; 磁共振; 计算机断层扫描; 精准医疗

【基金项目】杭州市医药卫生项目 (20211231Y058, A20220386, 2022WJC175, A20241582)

【收稿日期】2026 年 2 月 15 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 30 日 **【DOI】**10.12208/j.ijmd.20260002

Advances in imaging research of carpal tunnel syndrome

Haifeng Zhang, Bo Feng, Ming Zhan, Hanlin Zhu, Heng Lu*

Department of Radiology, Hangzhou Ninth Hospital, Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】 Carpal tunnel syndrome (CTS) is a common nerve entrapment disease that significantly impacts patients' quality of life. Imaging techniques play a pivotal role in the diagnosis, treatment, and research of CTS. This review details the epidemiology and pathological mechanism of CTS, along with the clinical applications of three key imaging modalities: ultrasound, magnetic resonance imaging (MRI), and computed tomography (CT). Additionally, it offers an outlook on the potential applications of emerging imaging technologies, the evolving trend of multidisciplinary collaboration, and the development direction of personalized and precision medicine.

【Keywords】 Carpal tunnel syndrome; Ultrasound; Magnetic resonance imaging; Computed tomography; Precision medicine

腕管综合征 (Carpal tunnel syndrome, CTS) 主要由正中神经在腕管受到压迫而造成手部正中神经支配区, 即拇、示、中指及环指的桡侧半疼痛、麻木和大鱼际肌无力及进行性大鱼际肌萎缩^[1]。腕管由腕骨和屈肌支持带构成, 形似骨纤维隧道。正中神经源于颈 5 至胸 1 脊髓节段的腹侧初级分支, 由臂丛的内侧束和外侧束组成, 自颈部脊髓发出后沿肱骨内侧下行, 经前臂穿过腕管进入手掌^[2]。在腕管内, 正中神经与屈指肌腱等结构共同存在, 空间相对狭小。任何导致腕管内容物体积增加或腕管空间减小的因素, 都可能引发正中神经受压, 进而导致 CTS。

1 CTS 的流行病学与病理机制

1.1 CTS 的流行病学特征

CTS 是一种常见的周围神经卡压性疾病, 女性发病率高于男性, 约占所有报道病例的 65%~75%, 且发病高峰年龄在 40~60 岁^[3,4]。其发病与多种因素相关, 糖尿病被认为与 CTS 具有较强的关联性。在糖尿病神经病变患者中, CTS 的患病率可达 30%, 无神经病变症状的糖尿病患者中患病率也有 14%^[4]。此外, 肥胖、妊娠、甲状腺功能减退、类风湿关节炎、痛风、外周水肿、肢端肥大症、肿瘤、创伤等也是 CTS 的危险因素^[4,5]。

一项针对我国办公室工作人员的研究发现, CTS 的患病率高达 9.6%, 手腕与手部症状的患病率分别为 22%和 15%, 主要风险因素包括长时间电脑使用、工作强度大及持续疼痛状态下工作。值得注意的是,

第一作者简介: 张海峰 (1987-) 女, 山东潍坊人, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 影像诊断, 擅长肌肉、腹部疾病诊断;

*通讯作者: 冯波

教育水平与 CTS 呈负相关, 而吸烟者出现手部症状的风险显著升高。研究提示, 高强度计算机操作、不良工作模式是职业相关 CTS 的重要诱因^[6]。

1.2 CTS 的病理生理机制

CTS 的病理生理机制较为复杂, 目前尚未完全明确。一般认为, 正中神经在腕管内受到压迫和牵引是主要原因。从组织学角度来看, 腕管内的滑膜增生、纤维化以及血管改变等都可能引起正中神经受压。无明确继发病因的正中神经在腕管内受压是 CTS 最常见的类型, 称特发性 CTS^[7]。研究发现, 与特发性 CTS 患者相比, 糖尿病性 CTS 患者的滑膜水肿发生率更高(特发性 CTS 为 57%, 糖尿病性 CTS 为 87%), 血管增生(特发性 CTS 为 30.8%, 糖尿病性 CTS 为 90.5%)和血管壁增厚(特发性 CTS 为 11.5%, 糖尿病性 CTS 为 90.5%)也更为明显, 这可能与糖尿病导致的代谢紊乱和微血管病变有关^[7]。此外, 一些研究表明, 重复性的手腕和手指运动可能导致腕管内压力升高, 进而损伤正中神经。例如, 轮椅使用者由于长期使用手腕推动轮椅, CTS 的发生率较高, 这可能与手腕在运动过程中, 正中神经受到反复的摩擦和压迫有关^[8]。同时, 神经自身的内在改变, 如轴突和髓鞘的损伤, 也在 CTS 的发病过程中起到一定作用。

2 CTS 的影像学诊断及治疗中应用

CTS 早期诊断主要依赖于临床症状和体征, 随着现代技术发展, 影像学技术在 CTS 的诊断和研究中应用逐渐广泛。电生理检查成为重要的诊断方法, 但该方法具有一定的侵入性和局限性。影像技术因其便捷、无创等优点, 逐渐在 CTS 的诊断中得到应用。

2.1 超声在 CTS 诊断中的应用

超声在 CTS 诊断中具有重要价值, 具有便捷、无创及动态观察等优势。通过测量正中神经横截面积(Cross-sectional area, CSA), 可为诊断提供关键依据。研究显示, 临床确诊 CTS 患者的腕管入口处正中神经 CSA 14.6mm² 显著大于健康对照组 8.7mm², 且 CSA > 9.15mm² 时, 诊断敏感性可达 75.81%, 特异性为 74.29%^[9,10]。此外, 多普勒超声可检测正中神经血流变化, 发现其血流增加且与疾病严重程度相关, 该指标诊断敏感性达 90.9%, 特异性为 94.0%^[11]。同时, 超声还能动态观察神经位移及滑膜结缔组织厚度等参数, 例如有症状 CTS 患者的滑膜

结缔组织厚度较无症状者增加 38.5%, 剪切应变指数升高 39.2%, 提示其在早期病理生理评估中的潜力^[12,13]。

2.2 磁共振成像在 CTS 中的应用

磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)能对腕管内软组织结构, 如正中神经、屈肌腱、韧带等的进行高分辨率成像, 能够精准识别细微病变并评估神经受压程度。相较于其他技术, MRI 可通过多角度、多参数扫描提供更丰富的组织信息, 例如通过观察正中神经信号异常及周围组织病理改变, 辅助疾病的精确诊断。一项研究对比了 21 例肢端肥大症患者的 MRI 数据, 发现 CTS 患者 CSA 18.7mm² 显著大于无 CTS 患者 10.5mm², 同时神经传导速度亦存在差异, 进一步验证了 MRI 在定量评估中的可靠性^[14]。

在病理机制研究方面, MRI 结合扩散张量成像(Diffusion tensor imaging, DTI)技术可测量正中神经的各向异性分数(Fractional anisotropy, FA)和表观扩散系数(Apparent diffusion coefficient, ADC), 从而反映神经纤维完整性及髓鞘损伤程度^[15]。CTS 患者的 FA 值通常降低, ADC 值升高, 其中 FA 值在腕管入口处的诊断准确性较高。此外, MRI 还能发现腕管内的其他病变, 如腱鞘囊肿、退行性骨囊肿等。一项对 69 例临床和电生理确诊的 CTS 患者进行 MRI 分析时, 共检出 29 个退行性骨囊肿、28 个腱鞘囊肿等其他病变^[16]。这些发现对制定个体化治疗方案具有重要的价值。

2.3 计算机断层扫描在 CTS 中的应用

尽管计算机断层扫描(Computed tomography, CT)在软组织显像方面逊色于超声和 MRI, 但其在评估腕骨病变, 如骨折、骨质增生等方面具有独特优势, 而这些病变可能是引发 CTS 的关键因素^[17]。CT 能清晰显示腕骨的形态、结构及骨质异常, 可辅助判断腕管狭窄的骨性原因。例如, 针对远端桡骨骨样骨瘤导致的 CTS, CT 可作为术前诊断的重要补充, 结合 X 线、骨闪烁显像及 MRI 等多模态影像学检查, 为手术规划提供可靠依据, 术后患者症状改善显著^[17]。虽然 CT 在 CTS 诊断中的应用相对有限, 但在特定情况下, 对于明确病因、制定治疗方案仍具有一定的价值。

3 影像引导下的 CTS 微创治疗

影像引导下的 CTS 微创治疗是近年来的重要发

展方向,其优势在于精准定位与实时动态监测。超声引导下神经周围注射及经皮腕横韧带松解术均展现出良好的有效性与安全性,且无严重并发症发生^[18]。此外,动态超声还可用于术后疗效评估,通过观察减压后正中神经的形态变化,确认手术的完整性和有效性^[19]。影像引导下的微创治疗不仅具备创伤小、恢复快的优势,更能通过精准操作提升治疗安全性与有效性,为 CTS 患者提供了更优化的治疗。

4 影像技术在 CTS 手术疗效评估中的应用

影像技术在 CTS 手术疗效评估中发挥着重要作用。超声可通过测量正中神经的 CSA 及水肿长度等参数,量化手术对神经压迫的缓解程度。一项对 31 例严重 CTS 患者行内镜腕管松解术后的研究发现,术后 3 个月神经水肿长度、腕管入口处前后径及 CSA 均显著改善,至术后 12 个月时接近正常水平,但与健康志愿者相比仍存在统计学差异^[20]。MRI 则能提供更全面的术后结构信息,包括神经形态、体积变化及潜在并发症,如瘢痕形成或再受压等。一项对 19 例接受开放或内镜腕管松解术的患者进行 MRI 分析,结果显示两种术式术后 6 个月腕管及正中神经的形态学变化无显著差异,均表现为腕管体积增加,提示其在改善腕管结构方面具有相似效果^[21]。影像学评估为术后疗效提供了可视化、可量化的依据,助力医生动态调整治疗策略。

5 影像技术在 CTS 康复中的作用

影像技术在 CTS 康复阶段的监测与指导中同样发挥关键作用。超声弹性成像可实时捕捉正中神经的生物力学变化,为早期评估康复效果提供新视角。一项针对 35 例轻度 CTS 患者的研究显示,接受夹板联合运动疗法后,超声弹性成像发现正中神经硬度显著降低,而传统超声测量的 CSA 等参数变化不明显,说明弹性成像能更灵敏地反映神经的弹性恢复^[22]。MRI 则从宏观层面监测腕管及神经的结构恢复,例如评估术后瘢痕、神经再受压或慢性炎症的残留情况,并指导康复方案的调整。通过定期影像检查,医生可动态追踪康复进程,优化干预措施,从而提升康复效率与针对性。

6 CTS 影像研究的未来展望

影像技术为 CTS 的诊断与研究提供了新方向。其中,超声弹性成像技术通过评估组织硬度,可检测正中神经弹性值的变化,其与健康人群差异已被证实有助于 CTS 的早期诊断及病情监测^[22,23]。此

外,基于人工智能的影像分析技术也具有广阔应用潜力,其可通过深度学习对超声、MRI 等影像数据进行快速、精准的形态与结构特征识别,从而辅助医生提升诊断效率与准确性^[24-26]。这些技术的应用有望进一步优化 CTS 的诊疗水平。

CTS 的影像研究正呈现多学科协作趋势。影像学与神经科学的结合,可深入解析疾病病理生理机制,神经电生理检查与影像学数据联合分析,能同步评估正中神经的功能状态与结构改变,为治疗方案提供更精准依据^[27]。影像学与外科学的协同亦日益紧密:术前通过影像精确评估病变程度,有助于个性化手术设计;术中影像引导可提高手术操作的准确性与安全性;术后影像学则可用于疗效评估与康复指导^[28-30]。同时,康复医学、病理学等领域的参与,推动了诊疗与康复的全面整合。

个性化与精准医疗是未来研究的重要方向。通过超声、MRI 等技术对正中神经及周围组织的个体化形态学分析,可为患者匹配最佳治疗策略,通过动态监测结果优化个性化康复方案,改善患者预后与生活质量。

综上,影像技术、多学科协作及精准医疗的融合,将推动 CTS 诊疗向更高效、更个体化的方向发展。

参考文献

- [1] 曹瑾瑾,芮晶,劳杰,腕管综合征临床诊断进展.中华手外科杂志,2023, 39(02): 189-192.
- [2] 骆耐香,秦小云,周思兰,等.腕管综合征的解剖学基础《中华解剖与临床杂志》2005, 10(03)10.3760/cma.j.issn.1671-7163.2005.03.107.
- [3] Dahlin LB, Zimmerman M, Calcagni M, et al. Carpal tunnel syndrome. Nat Rev Dis Primers. 2024, 10(1):37.
- [4] Currie KB, Tadisina KK, Mackinnon SE. Common Hand Conditions: A Review. JAMA. 2022, 327(24):2434-2445.
- [5] Vouzouneraki K, Esposito D, Mukka S, et al. Carpal tunnel syndrome in acromegaly: a nationwide study. Eur J Endocrinol. 2021;184(2):209-216.
- [6] Feng B, Chen K, Zhu X, et al. Prevalence and risk factors of self-reported wrist and hand symptoms and clinically confirmed carpal tunnel syndrome among office workers in

- China: a cross-sectional study. *BMC Public Health*. 2021 , 21(1):57.
- [7] Tekin F, Sürmeli M, Şimşek H, et al. Comparison of the histopathological findings of patients with diabetic and idiopathic carpal tunnel syndrome. *Int Orthop*. 2015, 39(12):2395-401.
- [8] Zukowski LA, Roper JA, Shechtman O, Otsel DM, Hovis PW, Tillman MD. Wheelchair ergonomic hand drive mechanism use improves wrist mechanics associated with carpal tunnel syndrome. *J Rehabil Res Dev*. 2014;51(10): 1515-24.
- [9] Fu T, Cao M, Liu F, et al. Carpal tunnel syndrome assessment with ultrasonography: value of inlet-to-outlet median nerve area ratio in patients versus healthy volunteers. *PLoS One*. 2015, 10(1):e0116777.
- [10] Bueno-Gracia Elena, Estebanez-de-Miguel Elena, Fanlo-Mazas Pablo, et al: [Diagnostic validity of ultrasonography in carpal tunnel syndrome]. *Rev Neurol*. 2015, 61(1):1-6. Spanish.
- [11] Kutlar N, Bayrak AO, Bayrak İK, et al. Diagnosing carpal tunnel syndrome with Doppler ultrasonography: a comparison of ultrasonographic measurements and electrophysiological severity. *Neurol Res*. 2017 , 39(2): 126-132.
- [12] Tat J, Wilson KE, Keir PJ. Pathological changes in the subsynovial connective tissue increase with self-reported carpal tunnel syndrome symptoms. *Clin Biomech (Bristol)*. 2015, 30(4):360-5.
- [13] Nanno M, Sawaizumi T, Kodera N, et al. Transverse Ultrasound Assessment of the Displacement of the Median Nerve in the Carpal Tunnel during Wrist and Finger Motion in Healthy Volunteers. *J Nippon Med Sch*. 2015;82(4):170-9.
- [14] Sasagawa Y, Tachibana O, Doai M, et al. Median nerve conduction studies and wrist magnetic resonance imaging in acromegalic patients with carpal tunnel syndrome. *Pituitary*. 2015, 18(5):695-700.
- [15] Heckel A, Weiler M, Xia A, , et al. Peripheral Nerve Diffusion Tensor Imaging: Assessment of Axon and Myelin Sheath Integrity. *PLoS One*. 2015, 10(6):e0130833.
- [16] Onen MR, Kayalar AE, Ilbas EN, et al. The Role of Wrist Magnetic Resonance Imaging in the Differential Diagnosis of the Carpal Tunnel Syndrome. *Turk Neurosurg*. 2015;25(5):701-6.
- [17] Basran SS, Kumar S, Jameel J, Sajid I. Carpal tunnel syndrome: A rare manifestation of distal radius osteoid osteoma. *J Clin Orthop Trauma*. 2015, 6(3):190-4.
- [18] Lam KHS, Wu YT, Reeves KD, et al. Ultrasound-Guided Interventions for Carpal Tunnel Syndrome: A Systematic Review and Meta-Analyses. *Diagnostics (Basel)*. 2023 , 13(6):1138.
- [19] Chen CH, Jaw FS, Hu JZ, et al. Dynamic ultrasound for evaluating the adequacy of median nerve decompression following minimally invasive carpal tunnel release: technical innovation and case study. *Heliyon*. 2023, 9(1):e13107.
- [20] Li M, Jiang J, Zhou Q, et al. Sonographic follow-up after endoscopic carpal tunnel release for severe carpal tunnel syndrome: a one-year neuroanatomical prospective observational study. *BMC MusculoskeletDisord*. 2019, 20(1):157.
- [21] Peters BR, Martin AM, Memauri BF, et al. Morphologic Analysis of the Carpal Tunnel and Median Nerve Following Open and Endoscopic Carpal Tunnel Release. *Hand (N Y)*. 2021, 16(3):310-315.
- [22] Polat YD, Aydın E, Ince FS, et al. Sonoelastic response of median nerve to rehabilitation in carpal tunnel syndrome. *J Ultrason*. 2020;20(81):e90-e94.
- [23] Dąbrowska-Thing A, Zakrzewski J, Nowak O, et al. Ultrasound elastography as a potential method to evaluate entrapment neuropathies in elite athletes: a mini-review. *Pol J Radiol*. 2019, 84:e625-e629.
- [24] Mekki YM, Rhim HC, Daneshvar D, et al. Applications of artificial intelligence in ultrasound imaging for carpal-tunnel syndrome diagnosis: a scoping review. *Int Orthop*. 2025, 49(4):965-973.
- [25] Mohammadi A, Torres-Cuenca T, Mirza-Aghazadeh-Attari M, et al. Deep Radiomics Features of Median Nerves for

- Automated Diagnosis of Carpal Tunnel Syndrome With Ultrasound Images: A Multi-Center Study. *J Ultrasound Med.* 2023, 42(10):2257-2268.
- [26] Kim SW, Kim S, Shin D, et al. Feasibility of artificial intelligence assisted quantitative muscle ultrasound in carpal tunnel syndrome. *BMC MusculoskeletDisord.* 2023, 24(1):524.
- [27] Deng X, Chau PL, Chiu SY, et al. Neural plasticity secondary to carpal tunnel syndrome: a pseudo-continuous arterial spin labeling study. *Neural Regen Res.* 2021, 16(1):158-165.
- [28] Zou Q, Guo X, Ni X, et al. Ultrasound-based grading of carpal tunnel syndrome: a comparative study of cross-sectional area and shear wave elastography at different wrist joint angles. *Br J Radiol.* 2025, 98(1165):58-67.
- [29] Jengojan S, Sorgo P, Piacentini A, et al. Ultrasound-guided minimally invasive thread release of carpal tunnel: a cadaveric study. *Radiol Med.* 2025, 130(4):524-533.
- [30] Padua L, Cuccagna C, Giovannini S, et al. Carpal tunnel syndrome: updated evidence and new questions. *Lancet Neurol.* 2023, 22(3):255-267.
- 版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS