

形态与功能并重：多节段腰椎管狭窄症责任节段判定的影像学进展

宋伯伦

山东大学齐鲁第二医院脊柱外科, 山东 济南

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月9日

摘要

多节段腰椎管狭窄症的责任节段判定是脊柱外科临床决策的关键难题。常规MRI虽能清晰显示多节段解剖狭窄, 但其形态学发现与临床症状之间的不匹配现象长期困扰临床实践。本文系统综述近十年来责任节段判定影像学方法的研究进展, 从传统形态学评估、功能成像技术、有创诊断及人工智能新范式四个维度展开论述, 并对所引文献的研究设计、样本量、证据等级进行批判性分析。在此基础上, 本文进一步探讨各项技术在临床实践中的整合应用策略, 提出基于阶梯式决策逻辑的责任节段判定流程图: 以临床评估为基础, 优先采用无创功能成像(DTI)进行初筛, 对于结果不明确或高危病例, 升级至有创诊断(CTM或SNRB), 并以人工智能辅助分析作为定量化决策支持工具。未来研究应开展前瞻性、多中心、大样本研究, 建立标准化的影像采集与分析方法, 并开发整合多模态信息的临床决策支持系统, 以提高责任节段判定的循证医学证据等级和临床可操作性。

关键词

腰椎管狭窄症, 责任节段, 影像学, 扩散张量成像, 人工智能, 影像组学, 临床决策流程

Integrating Morphology and Function: Advances in Imaging Methods for Identifying Responsible Segments in Multilevel Lumbar Spinal Stenosis

Bolun Song

Department of Spinal Surgery, The Second Qilu Hospital of Shandong University, Jinan Shandong

Received: March 8, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 9, 2026

Abstract

Identifying the responsible segments in multilevel lumbar spinal stenosis remains a critical challenge in spinal surgery clinical decision-making. Although conventional MRI can clearly demonstrate multilevel anatomical narrowing, the persistent mismatch between morphological findings and clinical symptoms has long perplexed clinical practice. This article systematically reviews the progress over the past decade in imaging methods for identifying responsible segments, addressing four dimensions: traditional morphological assessment, functional imaging techniques, invasive diagnostic procedures, and the emerging paradigm of artificial intelligence. A critical appraisal of study design, sample size, and level of evidence for the cited literature is provided. Building upon this analysis, this article further explores the integrated application strategies of these techniques in clinical practice, proposing a stepwise decision-making algorithm for responsible segment identification: commencing with clinical assessment, prioritizing non-invasive functional imaging (DTI) for initial screening, escalating to invasive diagnostics (CTM or SNRB) for cases with equivocal findings or high-risk profiles, and utilizing artificial intelligence-assisted analysis as a quantitative decision support tool. Future research should prioritize prospective, multicenter, large-sample studies, establish standardized imaging acquisition and analysis protocols, and develop clinical decision support systems integrating multimodal information to enhance both the level of evidence and clinical operability for responsible segment identification.

Keywords

Lumbar Spinal Stenosis, Responsible Segments, Imaging, Diffusion Tensor Imaging, Artificial Intelligence, Radiomics, Clinical Decision Algorithm

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. 引言

腰椎管狭窄症(lumbar spinal stenosis, LSS)是一种与年龄相关的退行性疾病,临床特征为腰背部或下肢疼痛,可伴神经源性间歇性跛行。流行病学数据显示,60岁以上人群中该病发生率是19%~47%,是65岁以上患者接受脊柱外科手术的最常见原因[1][2]。随着人口老龄化进程加速,腰椎管狭窄症所带来的医疗负担日益凸显。

临床实践中,常规腰椎MRI常显示多节段存在椎管、侧隐窝或椎间孔狭窄,但患者的临床症状与体征往往仅由其中某一节段引起,这一“责任节段”的精准判定直接关系到手术减压范围的选择。过度减压将破坏脊柱稳定性,增加邻近节段退变风险,而减压不足则可能导致症状残留,影响手术疗效[3]。因此,从多节段狭窄中准确识别责任节段构成了腰椎管狭窄症诊疗的核心科学问题。

常规MRI凭借其高分辨率、无电离辐射损伤等优势,已成为腰椎管狭窄症的首选影像学检查手段[4]。然而,大量研究证实,腰椎管狭窄症患者中常规MRI表现与临床症状之间存在不相符的现象[5]。这种“形态-功能悖论”提示,单纯依赖解剖形态学信息难以全面揭示神经根的功能状态。针对临床症状与MRI表现不一致的患者,如何精准定位责任神经根仍是目前临床实践中缺乏共识的难题[6]。

近十年来,随着功能成像技术、影像组学及人工智能的快速发展,责任节段判定方法正经历从静态解剖向动态功能、从定性描述向定量分析的深刻转变。扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)技术可

对腰骶丛神经进行定量分析,实现责任神经根的无创评估;CT脊髓造影(CT myelography, CTM)及其影像组学分析能够在动态负荷状态下揭示神经受压的本质;选择性神经根封闭(selective nerve root block, SNRB)作为有创诊断的参考标准,其精准定位价值在影像-临床不符的复杂病例中重新获得重视;而以深度学习为核心的智能分割与影像组学技术,正推动责任节段判定从经验定性向定量客观转变。本文系统综述上述领域的研究进展,并对所引文献的研究设计、样本量、证据等级进行批判性分析。在此基础上,本文进一步探讨各项技术在临床实践中的整合应用策略,提出阶梯式决策逻辑的责任节段判定流程,以期临床决策与后续研究提供具有操作指导意义的参考框架。

2. 传统形态学影像及其局限

2.1. 常规 MRI 的临床价值与困境

常规 MRI 凭借多平面成像能力和优异的软组织对比度,能够清晰显示椎间盘突出、黄韧带肥厚、小关节增生等退行性改变,已成为评估腰椎管狭窄严重程度的金标准[4]。目前临床常用的分级系统,如 Lee 等的椎管狭窄分级[7]、Schizas 等的硬膜囊形态分级[5],为狭窄程度评估提供了相对标准化的工具。然而,这些分级系统的观察者间一致性指标范围为“一般”至“优质”(Cohen's kappa 0.323~0.702)[8],表明形态学评估本身即存在一定主观性。Miskin 等[8]的研究为单中心回顾性研究,纳入 50 例患者,由 3 名非放射科脊柱专家独立阅片,其结果虽能为临床沟通提供参考,但由于样本量有限且为单中心设计,外部代表性尚需进一步验证,观察者间一致性仍不理想,提示即便采用标准化分级系统,主观因素仍难以完全消除。

2.2. CT 及脊髓造影的临床应用

CT 在评估腰椎管骨性结构方面具有独特优势,能够清晰显示椎体后缘骨赘、小关节增生、黄韧带骨化等改变[9],但在评估硬膜囊及神经根受压方面价值有限。脊髓造影通过鞘内注射碘对比剂,使硬膜囊和神经根鞘显影,可在站立位或过伸过屈位等动态负荷下观察脑脊液柱的充盈缺损和神经根受压情况[10]。CT 脊髓造影则结合了两者的优势,既可显示骨性结构,又能清晰呈现硬膜囊和神经根的形态。

对于多节段腰椎管狭窄症患者,CT 脊髓造影能够在症状诱发体位下成像,更真实地反映神经根在生理负荷下的受压状态[11]。Morgalla 等[11]发表于 2018 年的临床研究证实,功能性脊髓造影在多节段腰椎管狭窄症诊断中具有高灵敏度(0.99)与特异性(0.79),且其诊断信息可改变 22% 患者的手术方案。但该研究为单中心前瞻性研究,样本量仅 50 例,证据等级中等。

3. 功能成像技术的兴起与证据等级分析

3.1. 扩散张量成像的病理生理基础与证据等级

扩散张量成像是一种基于水分子扩散运动的 MRI 技术,通过定量评估组织微观结构完整性,为神经根功能状态评估提供了全新视角。神经根受压后,会出现轴浆流动障碍、髓鞘脱失、轴索变性等一系列病理改变,这些改变将导致水分子扩散的各向异性程度下降[12]。DTI 的主要参数包括各向异性分数(fractional anisotropy, FA)和表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC),前者反映神经纤维的定向性与完整性,后者反映水分子的总体扩散能力[13]。

钱贵珍和苗重昌[14]发表于 2024 年的综述系统回顾了 DTI 在腰椎管狭窄症中的应用进展,该综述引用了多项 DTI 原始研究,但所引文献多为单中心、小样本、回顾性研究。Sakai 等[15]的 DTI 研究首次采用冠状位单次激发涡轮自旋-回波序列(TSE-DTI)评估腰椎神经根功能,通过多点测量 FA 值以识别动态位置下压塞的责任神经根。该研究纳入 5 例双侧腰椎管狭窄但表现为单侧症状的患者,为创新性的概念

验证(proof-of-concept)性研究,但样本量较小(仅5例),且为单中心、非随机化研究,其结论的外推性有待更大样本量的前瞻性研究进一步验证。Li等[16]的DTI研究纳入45例腰椎间盘突出患者,根据其数据采集时间跨度推断为回顾性设计,发现受压侧神经根FA值显著低于对侧(0.196 ± 0.020 vs. 0.272 ± 0.016),但样本量有限且缺乏独立验证队列。Eguchi等[17]发表了一项前瞻性初步研究,纳入13例单侧腰椎间盘突出症引起的神经根病患者,采用1.5T MR扫描仪进行DTI检查,患者均接受显微椎间盘切除术。研究发现,与健侧相比,受压侧FA值显著降低($p=0.0005$),ADC值显著升高($p=0.0115$);术后6个月FA值显著回升($p=0.020$),而ADC值虽有下降但未达统计学显著性。该研究为初步研究(preliminary study),样本量较小(13例)且为单中心设计,结论的外推性仍需更大样本量和多中心研究进一步验证。

总体而言,DTI领域现有研究证据等级偏低,主要表现为:①多为单中心研究,缺乏多中心外部验证;②样本量普遍在20~50例之间,统计效能有限;③研究设计以回顾性为主,存在选择偏倚风险;④缺乏统一的扫描参数和后处理流程,研究间可比性差。

3.2. 神经根封闭的诊断价值与证据等级

选择性神经根封闭是一种兼具诊断与治疗作用的微创介入技术。其原理是在影像引导下将局部麻醉药精准注射至目标神经根周围,若注射后患者原有症状暂时缓解,则证实该神经根为责任神经根[18]。这一方法通过“症状-阻滞”的直接因果验证,被认为是影像-临床不符病例中责任节段判定的重要参考标准[6]。Sasso等[6]发表于2005年的前瞻性研究指出,对于MRI表现不明确、多节段压迫或与临床症状不符的颈椎或腰椎神经根病患者,选择性神经根阻滞(SNRB)在预测手术结果方面优于MRI,其阳性预测值达91%,且当SNRB与MRI结果相悖时,手术结局更倾向于支持SNRB所定位的节段。该结论基于对101例患者的前瞻性队列分析结果,具有较高的临床参考价值。

Shim等[19]进行了一项回顾性队列研究,纳入93例MRI表现与临床症状不一致的腰椎管狭窄症患者。研究方案设计为:首次选择性神经根阻滞(SNRB)靶向MRI显示的狭窄节段,一周后评估疗效;若无改善,则针对临床症状节段提示的节段进行第二次阻滞。结果显示,在椎间孔狭窄亚组中($n=31$),77.4%的患者对基于MRI定位的首次阻滞无反应,而对基于临床症状定位的第二次阻滞反应良好($p<0.01$)。该研究为单中心、回顾性设计,样本量在同类回顾性研究中尚可,但缺乏外部验证,随访时间仅3个月,远期疗效尚不明确。

3.3. CT脊髓造影的影像组学分析与证据等级

Fan等[20]发表于2023年的研究对219例多节段腰椎管狭窄症(multi-level LSS)患者的CTM图像进行影像组学分析,从1095个腰椎节段中提取高通量影像组学特征。该研究将数据随机划分为训练集与测试集(8:2),采用独立测试集进行内部验证,但未使用外部数据集。研究发现,在15个影像组学预测因子中,特征重要性分析显示其前5个重要特征包括2个纹理特征、2个一阶强度特征和1个形状特征。基于这些特征建立的机器学习模型在独立测试集中的ROC-AUC超过0.90。该研究的优势在于样本量较大、对影像组学特征进行了可解释性分析。但该研究为回顾性设计,存在选择偏倚风险,且骨性椎管勾画仍需人工干预,尚未实现全自动分析。

3.4. 人工智能分割与分类的证据等级

Verheijen等[21]发表于2025年的系统综述全面评估了基于机器学习算法的腰椎管狭窄症分割与分类研究现状,纳入27项研究,其中9项聚焦分割任务,16项聚焦分类任务,2项同时涉及两者。该综述指出,仅有少数模型进行了外部验证,多数研究为单中心回顾性设计,且不同研究采用的结果评价指标存在较大差异,导致研究间难以直接比较。

Fan 等[22]基于 518 例 CTM 图像开发了基于 3D U-Net 的硬膜囊自动分割工具, 设置了五折交叉验证、独立测试集及外部验证集三重验证机制, 在外部验证集中取得了 0.928 ± 0.034 的 Dice 系数。该研究在外部验证设计上进行了探索, 但外部验证集样本量较小($n = 30$), 且数据来自同一中心的不同患者, 对所开发工具的泛化能力仍需进一步验证。

4. 整合式临床决策流程：从技术到实践的转化路径

前述分析表明, 各项技术在证据等级、临床可及性、有创程度等方面存在显著差异。如何将这些技术整合为一个具有实际操作指导意义的临床诊断流程, 是转化医学面临的核心挑战。本节提出基于阶梯式决策逻辑的责任节段判定流程, 旨在为临床医生提供清晰的操作指引。

4.1. 第一步：临床评估与初步分层

任何影像学检查的解读都应建立在扎实的临床评估基础之上。对于多节段腰椎管狭窄症患者, 首先应通过详细的病史采集和体格检查, 明确症状的性质、分布、诱发因素及缓解因素。具体而言, 应完成以下评估:

神经根定位: 根据疼痛、麻木的皮节分布, 初步判断可能的责任神经根水平。例如, L4 神经根受累表现为大腿前内侧感觉异常, 膝反射减弱; L5 神经根受累表现为小腿前外侧及足背内侧感觉异常, 足背伸肌力减弱; S1 神经根受累表现为足外侧及足底感觉异常, 踝反射减弱, 足跖屈肌力减弱。

症状特征分析: 明确是否存在神经源性间歇性跛行, 其特点为站立或行走后出现下肢疼痛、麻木、无力, 弯腰或坐下后缓解。若症状与体位改变密切相关, 提示动态压迫因素可能起重要作用, 此时动态负荷下的影像学检查(如 CTM)可能更具诊断价值。

高危因素识别: 对于存在以下情况的患者, 应高度警惕影像-临床不符的可能, 并考虑升级检查: ① 椎间孔狭窄(根据 Shim 等[19]的研究, 该亚组中 77.4% 的患者对基于 MRI 定位的首次阻滞无反应); ② 多节段广泛狭窄, 难以通过临床体证明确责任节段; ③ 既往有脊柱手术史, 解剖结构改变干扰影像判读。

4.2. 第二步：无创功能成像初筛(DTI)

对于临床评估后责任节段仍不明确的患者, 可优先采用无创功能成像进行初筛。DTI 作为无创、无电离辐射的功能成像技术, 能够从微观结构层面评估神经根的功能状态, 适用于以下情况:

适用条件: ① 临床体征提示的单侧症状, 但 MRI 显示双侧或多节段狭窄; ② 临床症状与 MRI 显示的狭窄节段不完全一致; ③ 作为有创检查前的筛选手段, 减少不必要的有创操作。

判读要点: 目前文献中关于 DTI 的 FA 值诊断阈值尚无统一标准。Sakai 等的研究采用 TSE-DTI 序列并基于多点 FA 值测量对双侧椎管狭窄但表现单侧症状的患者进行评估, 结果显示症状侧 FA 值显著低于无症状侧, 提示 TSE-DTI 有潜力用于区分责任神经根。但该研究样本量极小(仅 5 例), 仅为技术验证性报告, 未提出可供临床推广的诊断阈值, 其结论尚需更大样本的前瞻性研究进一步验证。在现阶段临床应用中, 建议优先采用双侧 FA 值对比分析: 当症状侧 FA 值显著低于无症状侧时, 提示该神经根可能为责任节段。需注意, 目前尚缺乏多中心验证的诊断阈值, 判读时应结合临床症状综合判断。

局限性: 现有 DTI 研究证据等级偏低(证据等级 4~5 级), 技术操作复杂, 扫描时间长, 且不同设备、不同序列的参数不可比。因此, DTI 应作为初筛手段, 而非确诊依据。当 DTI 结果与临床症状不一致, 或患者存在高危因素时, 应考虑升级至有创诊断。

4.3. 第三步：有创诊断精确定位(CTM 或 SNRB)

对于 DTI 结果不明确、存在高危因素, 或需要精确指导介入治疗的患者, 可考虑升级至有创诊断。

CTM 和 SNRB 各有侧重，选择时应基于临床具体情况。

CTM 的选择时机：CTM 适用于以下情况：① 临床怀疑动态压迫因素(如站立或行走时症状加重)；② 需要同时评估多个节段的受压程度；③ 作为手术前解剖评估的一部分，明确减压范围。CTM 的优势在于能够在症状诱发体位下成像，更真实地反映神经根在生理负荷下的受压状态。Fan 等[20]的研究表明，基于 CTM 影像组学特征构建的机器学习模型能够较为准确地预测腰椎管狭窄症的手术减压节段，其最优分类器(EmbeddingLSVC_SVM)在独立测试集中的 ROC-AUC 超过 0.90 (具体数值原文未提供 95% CI)，显示出较高的判别能力。但该研究为回顾性设计，存在选择偏倚风险，且骨性椎管勾画仍需人工干预，尚未实现全自动分析。此外，CTM 检查本身存在电离辐射，且需鞘内注射造影剂，存在穿刺相关风险，临床应用需综合考量获益与风险。

SNRB 的选择时机：SNRB 适用于以下情况：① 影像学表现与临床症状严重不符，需要“症状 - 阻滞”直接验证；② 作为治疗性手段，兼具诊断和治疗双重目的；③ 术前明确责任节段，指导精准减压手术。Shim 等[19]的回顾性研究证实，SNRB 在椎间孔狭窄患者中尤其有价值，数据显示 77.4% 的患者对基于 MRI 定位的首次阻滞无反应。SNRB 的证据等级相对较高(证据等级 2 级)，但作为有创操作，存在神经损伤、血管内注射、感染等风险，且技术要求较高。

CTM 与 SNRB 的互补关系：两种方法并非互斥，而可根据临床需求互补使用。对于需要明确解剖压迫节段且评估动态负荷影响的患者，优先选择 CTM；对于需要验证因果关系且具有治疗需求的患者，优先选择 SNRB。在复杂病例中，可先进行 CTM 获取解剖信息，再针对可疑节段行 SNRB 验证。

4.4. 第四步：人工智能辅助定量分析

人工智能技术，特别是深度学习和影像组学，可作为贯穿全流程的辅助工具，提高诊断的客观性和一致性。

分割与定量：深度学习自动分割技术可快速、准确地测量硬膜囊横截面积、椎管前后径等定量指标。Fan 等[22]开发的 3D U-Net 分割工具可自动分割硬膜囊，在临床应用评估中，仍有 59.0% (263/446)的自动分割掩膜需要人工修正，但自动分割与人工修正后的硬膜囊横截面积(CSA)无显著差异($p = 0.652$)，且两者呈强相关($r = 0.805$)，体现了该工具在辅助批量、标准化测量中的技术潜力。在临床实践中，可应用此类工具辅助影像科医生快速完成定量评估。

影像组学辅助决策：对于 CTM 图像，可提取影像组学特征，结合机器学习模型预测责任节段。Fan 等[20]的研究显示，其构建的机器学习模型预测效能良好，两个最优分类器在独立测试中的 ROC-AUC 均超过 0.90，展现了较高的判别能力，已达到临床可接受水平。

在具备相应技术条件的医疗中心，可将影像组学分析作为辅助决策工具，提供客观的定量参考。

整合决策支持系统：未来发展方向是开发整合临床特征、DTI 参数、CTM 影像组学特征、SNRB 结果的多模态预测模型，为临床医生提供个体化的责任节段概率预测。Collins 等[23]发表了一项研究方案，旨在系统性地开发 TRIPOD-AI 报告指南和 PROBAST-AI 偏倚风险评估工具，为人工智能预测模型研究的透明报告与严格评价提供方法学框架。

4.5. 整合式决策流程的临床操作指导

基于上述分析，本文提出以下整合式决策流程，供临床实践参考：

场景一：典型症状与 MRI 表现一致

无需进一步检查，直接根据 MRI 显示的狭窄节段制定手术方案。

场景二：症状典型但 MRI 显示多节段狭窄，无高危因素

首选 DTI 进行功能评估。当 DTI 显示症状侧 FA 值显著低于无症状侧时，提示该神经根可能为责任节段：

若 DTI 结果不明确，可考虑行 SNRB 验证。

场景三：症状典型但 MRI 显示多节段狭窄，存在高危因素(如椎间孔狭窄)

考虑直接行 SNRB。根据 Shim 等[19]的研究，椎间孔狭窄患者中多数对基于 MRI 定位的阻滞无反应，建议根据临床症状皮节定位进行阻滞。

场景四：症状不典型，或考虑动态压迫因素

优先选择 CTM。CTM 可在症状诱发体位下成像，更真实地反映动态负荷下的神经受压情况。

场景五：术前需要明确解剖范围和功能验证

可联合应用 CTM 和 SNRB。先以 CTM 明确解剖受压节段，再以 SNRB 验证因果关系，实现解剖与功能双重确认。

场景六：具备人工智能辅助条件的医疗中心

可在各环节引入 AI 辅助工具：自动分割辅助定量测量、影像组学辅助 CTM 图像分析、整合多模态数据的预测模型辅助决策。

5. 挑战与展望

5.1. 当前研究的证据等级局限性

综合前述分析，当前责任节段判定影像学方法的证据等级存在显著差异。DTI 研究以单中心、小样本、回顾性设计为主，证据等级偏低(牛津循证医学中心证据等级 4~5 级)。CTM 影像组学相关研究样本量相对较大，部分研究采用了外部验证，证据等级中等(证据等级 3 级)。SNRB 领域已有前瞻性队列研究(证据等级 2 级)，但缺乏多中心大样本随机对照试验。人工智能分割技术虽在分割精度上表现出色，但多数研究缺乏外部验证，证据等级参差不齐。

5.2. 临床转化路径的关键障碍

从技术到临床实践的转化面临多重障碍：① 缺乏统一的诊断阈值和参考标准，如 DTI 的 FA 值诊断阈值未经多中心验证；② 技术操作复杂度高，需要专业培训和专用软件，限制了基层医院的推广应用；③ 设备兼容性问题，不同厂家、不同场强设备的参数不可比；④ 循证医学证据等级不足，缺乏大规模前瞻性验证研究；⑤ 医疗支付体系尚未将 DTI、影像组学分析等新技术纳入常规医保覆盖范围。

5.3. 未来研究方向

为促进责任节段判定技术的临床转化，未来研究应着力于以下几个方面：

① 开展前瞻性多中心诊断性试验：以手术探查或 SNRB 为参考标准，评估 DTI、CTM、影像组学等方法的诊断效能，明确各自的最佳适应证。研究设计应遵循诊断性试验报告标准(STARD)，确保结果的可比性和可重复性。

② 建立标准化技术规范：制定 DTI 扫描参数、FA 值测量方法、影像组学特征提取流程的标准化指南，提高研究间的可比性，为建立统一的诊断阈值奠定基础。

③ 开发临床决策支持系统：整合临床特征、功能影像参数、影像组学特征、有创诊断结果，构建多模态预测模型。

④ 推进人工智能模型的临床验证：对已有 AI 模型开展多中心外部验证，评估其在不同人群、不同设备条件下的泛化能力。建立开放共享的标准化影像数据库，促进模型的持续优化和迭代。

⑤ 探索经济性评估：开展成本-效益分析，评估各项技术在不同临床场景下的经济性，为医保支付政策提供依据。

6. 结语

多节段腰椎管狭窄症责任节段的精准判定，是实现“精准减压、避免过度手术”理念的关键环节。近十年来，该领域经历了从常规MRI形态学评估，到DTI功能成像，再到影像组学与人工智能深度分析的快速发展。然而，现有研究证据等级参差不齐，多数研究为单中心、小样本、回顾性设计，缺乏前瞻性多中心外部验证。本文在系统综述各项技术研究进展与证据等级的基础上，进一步提出了整合式阶梯式决策流程，将临床评估、无创功能成像(DTI)、有创诊断(CTM/SNRB)、人工智能辅助分析有机整合，为影像-临床不符患者的责任节段判定提供了具有操作指导意义的临床路径。未来研究应着力于开展前瞻性多中心诊断性试验，建立标准化技术规范，开发临床决策支持系统，最终实现形态-功能-症状相统一的个体化精准诊断，为腰椎管狭窄症患者提供最优手术治疗方案。

参考文献

- [1] Mousavi, S.J., Lynch, A.C., Allaire, B.T., White, A.P. and Anderson, D.E. (2021) Walking Biomechanics and Spine Loading in Patients with Symptomatic Lumbar Spinal Stenosis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **9**, Article 751155. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.751155>
- [2] Gao, Q., Wei, F., Li, T., Zhu, K., Du, M., Heng, W., et al. (2022) Oblique Lateral Interbody Fusion vs. Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion for Lumbar Spinal Stenosis: A Retrospective Cohort Study. *Frontiers in Medicine*, **9**, Article 829426. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.829426>
- [3] Li, X., Luo, S., Fan, W., Zhou, T., Tan, D., Tan, R., et al. (2022) Macrophage Polarization Regulates Intervertebral Disc Degeneration by Modulating Cell Proliferation, Inflammation Mediator Secretion, and Extracellular Matrix Metabolism. *Frontiers in Immunology*, **13**, Article 922173. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.922173>
- [4] Pangarkar, S.S., Kang, D.G., Sandbrink, F., Bevevino, A., Tillisch, K., Konitzer, L., et al. (2019) VA/DoD Clinical Practice Guideline: Diagnosis and Treatment of Low Back Pain. *Journal of General Internal Medicine*, **34**, 2620-2629. <https://doi.org/10.1007/s11606-019-05086-4>
- [5] Schizas, C., Theumann, N., Burn, A., Tansey, R., Wardlaw, D., Smith, F.W., et al. (2010) Qualitative Grading of Severity of Lumbar Spinal Stenosis Based on the Morphology of the Dural Sac on Magnetic Resonance Images. *Spine*, **35**, 1919-1924. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181d359bd>
- [6] Sasso, R.C., Macadaeg, K., Nordmann, D. and Smith, M. (2005) Selective Nerve Root Injections Can Predict Surgical Outcome for Lumbar and Cervical Radiculopathy: Comparison to Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*, **18**, 471-478. <https://doi.org/10.1097/01.bsd.0000146761.36658.45>
- [7] Lee, G.Y., Lee, J.W., Choi, H.S., Oh, K. and Kang, H.S. (2011) Erratum To: A New Grading System of Lumbar Central Canal Stenosis on MRI: An Easy and Reliable Method. *Skeletal Radiology*, **40**, 1127-1127. <https://doi.org/10.1007/s00256-011-1153-z>
- [8] Miskin, N., Isaac, Z., Lu, Y., Makhni, M.C., Sarno, D.L., Smith, T.R., et al. (2021) Simplified Universal Grading of Lumbar Spine MRI Degenerative Findings: Inter-Reader Agreement of Non-Radiologist Spine Experts. *Pain Medicine*, **22**, 1485-1495. <https://doi.org/10.1093/pm/pnab098>
- [9] Nishikawa, M., Yoshimura, M., Naito, K., Yamagata, T., Goto, H., Hara, M., et al. (2023) The Symptomatic Calcification and Ossification of the Ligamentum Flavum in the Spine: Our Experience and Review of the Literature. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article 105. <https://doi.org/10.3390/jcm13010105>
- [10] Yamazaki, T., Suzuki, K., Yanaka, K. and Matsumura, A. (2006) Dynamic Computed Tomography Myelography for the Investigation of Cervical Degenerative Disease. *Neurologia medico-chirurgica*, **46**, 210-216. <https://doi.org/10.2176/nmc.46.210>
- [11] Frantz, S., Dezena, R., Pereira, C., Tatagiba, M. and Morgalla, M. (2018) Diagnosis of Lumbar Spinal Stenosis with Functional Myelography. *Journal of Neurological Surgery Part A: Central European Neurosurgery*, **79**, 316-322. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1618563>
- [12] Pesesse, P., Vanderthommen, M., Durieux, N., Zubkov, M. and Demoulin, C. (2024) Clinical Value and Reliability of Quantitative Assessments of Lumbosacral Nerve Root Using Diffusion Tensor and Diffusion Weighted MR Imaging: A Systematic Review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **60**, 1823-1839. <https://doi.org/10.1002/jmri.29213>

-
- [13] Liang, W., Han, B., Hai, Y., Yin, P., Chen, Y. and Zou, C. (2020) Diffusion Tensor Imaging with Fiber Tracking Provides a Valuable Quantitative and Clinical Evaluation for Compressed Lumbosacral Nerve Roots: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Spine Journal*, **30**, 818-828. <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06556-8>
- [14] 钱贵珍, 苗重昌. MRI 扩散张量成像在腰椎管狭窄症患者中的应用进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2024, 34(1): 91-93, 106.
- [15] Sakai, T., Aoki, Y., Watanabe, A., Yoneyama, M., Ochi, S. and Miyati, T. (2020) Functional Assessment of Lumbar Nerve Roots Using Coronal-Plane Single-Shot Turbo Spin-Echo Diffusion Tensor Imaging. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, **19**, 159-165. <https://doi.org/10.2463/mrms.tn.2019-0014>
- [16] Li, J., Wang, Y., Wang, Y., Lv, Y. and Ma, L. (2016) Study on Lumbosacral Nerve Root Compression Using DTI. *Biomedical Reports*, **5**, 353-356. <https://doi.org/10.3892/br.2016.734>
- [17] Eguchi, Y., Oikawa, Y., Suzuki, M., Orita, S., Yamauchi, K., Suzuki, M., *et al.* (2016) Diffusion Tensor Imaging of Radiculopathy in Patients with Lumbar Disc Herniation. *The Bone & Joint Journal*, **98**, 387-394. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.98b3.36036>
- [18] Narouze, S.N. (2010) Ultrasound-guided Interventional Procedures in Pain Management. *Regional Anesthesia and Pain Medicine*, **35**, S55-S58. <https://doi.org/10.1097/aap.0b013e3181d24658>
- [19] Shim, D.M., Baik, J.S., Yang, J. and Kwon, B. (2020) The Usefulness of Selective Nerve Block in Lumbar Spinal Stenosis in Cases with Inconsistent MRI Findings and Clinical Presentations. *Journal of Korean Society of Spine Surgery*, **27**, 70-76. <https://doi.org/10.4184/jkss.2020.27.2.70>
- [20] Fan, G., Wang, D., Li, Y., Xu, Z., Wang, H., Liu, H., *et al.* (2023) Machine Learning Predicts Decompression Levels for Lumbar Spinal Stenosis Using Canal Radiomic Features from Computed Tomography Myelography. *Diagnostics*, **14**, Article 53. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14010053>
- [21] Verheijen, E.J.A., Kapogiannis, T., Munteh, D., Chabros, J., Staring, M., Smith, T.R., *et al.* (2025) Artificial Intelligence for Segmentation and Classification in Lumbar Spinal Stenosis: An Overview of Current Methods. *European Spine Journal*, **34**, 1146-1155. <https://doi.org/10.1007/s00586-025-08672-9>
- [22] Fan, G., Li, Y., Wang, D., Zhang, J., Du, X., Liu, H., *et al.* (2024) Automatic Segmentation of Dura for Quantitative Analysis of Lumbar Stenosis: A Deep Learning Study with 518 CT Myelograms. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, **25**, e14378. <https://doi.org/10.1002/acm2.14378>
- [23] Collins, G.S., Dhiman, P., Andaur Navarro, C.L., Ma, J., Hooft, L., Reitsma, J.B., *et al.* (2021) Protocol for Development of a Reporting Guideline (TRIPOD-AI) and Risk of Bias Tool (PROBAST-AI) for Diagnostic and Prognostic Prediction Model Studies Based on Artificial Intelligence. *BMJ Open*, **11**, e048008. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-048008>