

# 定量MRI在椎间盘退变中的研究进展

林永花

青海省第五人民医院医学影像科, 青海 西宁

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

MRI已经成为诊断椎间盘退变的常规影像学检查技术, 定量MRI可以对椎间盘退变进行定量分析, 从而有助于诊疗策略制定、预后判断及疗效评价。本文对定量MRI在椎间盘退变中的应用研究进行综述。

## 关键词

定量磁共振成像, 椎间盘退变

# Research Progress of Quantitative MRI in Intervertebral Disc Degeneration

Yonghua Lin

Department of Medical Imaging, Fifth People's Hospital of Qinghai Province, Xining Qinghai

Received: April 26, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

MRI has become a routine imaging technique for diagnosing intervertebral disc degeneration. Quantitative MRI enables quantitative analysis of disc degeneration, thereby aiding in the formulation of treatment strategies, prognosis assessment, and efficacy evaluation. This article reviews the application research of intervertebral disc degeneration in quantitative MRI.

## Keywords

Quantitative Magnetic Resonance Imaging, Intervertebral Disc Degeneration

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

椎间盘源性腰痛的核心病因是椎间盘退变(IDD), 会引发局部疼痛、肢体活动受限等问题, 显著降低患者生活质量, 同时腰痛作为全球高发的健康问题, 也带来了沉重的社会与疾病负担[1][2]。常规 MRI 可以做到对于椎间盘的形态学改变及信号强度的显示, 但对于椎间盘退变的定量分析和早期诊断方面存在一定局限性[3][4]。

定量 MRI 在椎间盘退变及疼痛性椎间盘的评估中具备显著优势, 为椎间盘退变的评估提供了全新的技术方向[5][6]。所以, 本文对定量 MRI 在椎间盘退变中的应用研究展开综述。

## 2. DCE-MRI

动态对比增强磁共振成像(DCE-MRI)通过药代动力学模型可以评价椎体软骨下骨及软骨终板的微血管灌注, 能够揭示早期退变中灌注的异常变化, 近年来在 IDD 研究中展现出独特价值。Arpinar 等[7]通过对 56 例腰椎样本的分析, 发现退变椎间盘的终板灌注呈显著增强, 尤以颅侧终板为著, 这种灌注不足通过限制氧气和营养物质的输送、阻碍代谢废物清除, 直接参与或加剧髓核基质耗竭和软骨终板钙化的病理进程。Muftuler 等[8]进一步量化了 45 个腰椎间盘, 表明椎间盘退变程度与椎体终板 DCE-MRI 强化特征密切相关, Pfirrmann 分级越高, 终板区域灌注水平越显著, 且头尾侧终板强化差异性会随退变进展持续增大; 动物实验与机制研究进一步佐证[9], 在大鼠模型中, 衰老及病理性退变会造成椎体终板营养扩散能力下降, DCE-MRI 成像信号特征与终板组织钙化、微观结构损伤评分具有良好对应关系, 其强化程度与组织学钙化评分呈负相关, 可实现活体状态下对 IDD 病理演变的动态监测。DCE-MRI 为揭示椎间盘退变中的终板灌注改变、营养障碍及治疗反应提供了重要影像学工具, 有望成为 IDD 临床评估与疗效监测的补充手段。

## 3. DWI

扩散成像技术能够评估 IVDD 过程中组织微结构和水分子扩散的变化, 可从水分子扩散、微观结构异质性、微循环灌注等维度实现定量表征。

### 3.1. DWI 与 ADC 参数

弥散加权成像相关定量参数在椎间盘退变评估中具备重要应用价值, Sood 等[10]通过综述系统阐述了表观弥散系数(ADC)在评判椎间盘退变中的作用, 指出退变椎间盘的 ADC 值显著低于正常椎间盘, 其病理基础为正常椎间盘内高浓度的蛋白聚糖通过高渗透压维持水分子在胶原网络中的稳定扩散; 退变发生时, 蛋白聚糖大量降解导致水分子结合位点减少、水合能力下降, 同时胶原纤维断裂与交联丧失使基质致密化, 水分子的布朗运动自由度显著受限, ADC 值随之降低。此外, 微循环障碍与终板通透性下降进一步加剧椎间盘内物质转运受限, 亦促使 ADC 值降低; Kapoor 等[11]则进一步基于 3.0T MRI 研究, 对比分析了正常与退变腰椎间盘的 ADC 值及 T2\* mapping 参数特征, 指出上述定量指标可有效区分椎间盘的正常状态与退变程度, 同时发现, 髓核的 ADC 值下降幅度远大于纤维环, 这与髓核作为蛋白聚糖含量最高区域、对基质降解最为敏感的区域解剖特征高度一致, 体现了其在椎间盘退变超早期诊断中的独特价值。

### 3.2. DTI

DTI 能利用水分子各向异性扩散特性定量 NP 中微观成分和结构变化[12], 还能重建人椎间盘纤维环的三维结构, 证实正常纤维环呈高度有序的层状排列[13], 显示出比 ADC 更高的结构特异性。在颈椎间盘研究中证实, 轴向 DTI 可清晰显示纤维环板层结构的破坏, 颈椎间盘的 FA 值和 MD 值可以用来定量评估颈椎间盘的退化程度[14], 退变间盘的 ADC 值显著降低(平均  $1.29 \pm 0.17$  vs. 正常  $1.54 \pm 0.20$ ), 与退变分级呈强负相关( $r = -0.72$ ), 其病理实质在于蛋白聚糖大量降解、水合能力下降, 导致水分子在残余致密基质中的扩散受限加剧; 同时, 退变间盘的 FA 值显著升高(平均  $0.37 \pm 0.06$  vs. 正常  $0.28 \pm 0.05$ ), 与退变分级正相关( $r = 0.65$ ), 这一看似与纤维环各向异性丧失相悖的变化, 实则反映了退变进程中胶原纤维断裂紊乱后伴随的纤维软骨化生及髓核纤维化修复, 使组织整体方向性扩散增强。

### 3.3. DKI

扩散峰度成像(DKI)通过量化生物组织中的非高斯水扩散, 相较于高斯扩散模型的 DWI 与 DTI, DKI 以 MK、AK、RK 等峰度参数捕捉组织微结构复杂异质性, 可对早期椎间盘退变的细微变化提供更高的灵敏度[15]。Barnes 等[16]的系统综述指出, 平均峰度(MK)值可反映髓核内蛋白聚糖浓度及含水量的下降——随着椎间盘退变进展, 蛋白聚糖大量丢失导致水分子扩散阻碍减少, 组织异质性降低, MK 值相应下降, 这一改变往往早于 T2WI 信号强度的明显变化。也有文献表明[17], DKI 参数与组织学定量指标(如糖胺聚糖含量、胶原双折射强度)呈显著线性相关, 可无创监测从软骨终板微钙化、纤维环微小裂隙到髓核脱水的完整退变级联反应。因此, DKI 更能反映组织微观复杂度的改变。在动物模型综述中总结[18], DKI 参数对早期退变椎间盘内蛋白聚糖网络的细微降解较常规 DWI 更为敏感; Neil Abraham Barnes 等人发现[19]MK、AK 和 RK 在检测早期退行性改变方面优于常规扩散率和各向异性测量, 中下段腰椎最强, 尤其是髓核和前环。

### 3.4. 体素内不相干运动成像(IVIM)

IVIM 技术则无需外源性对比剂, 利用双指数模型分离纯水扩散与毛细血管微灌注, 在评估椎间盘营养通路方面具有一定的优势, 可能进一步反映致痛性椎间盘的复杂微观变化[20]。刘晨等[21]对研究对象的腰椎间盘行常规 MRI 及 IVIM-DWI 成像, 结果显示, 髓核 f 值在不同 Pfirrmann 分级间存在显著差异, f 值的降低反映了椎间盘内微循环灌注的减退, 说明灌注障碍与椎间盘退变中存在联系, 同时和患者下腰痛存在潜在关联, IVIM 参数 f 值在退变椎间盘中显著降低、反映终板微循环障碍。IVIM 能够同时获得组织扩散和微循环灌注信息, 对髓核早期水分子扩散变化和灌注改变更为敏感; 而 DTI 通过各向异性分数(FA)和表观弥散系数(ADC)等参数, 可更精细地反映纤维环胶原纤维排列的完整性与结构损伤, 从而在评价纤维环退变方面更具优势[22]。

## 4. SyMRI

合成 MRI (SyMRI)可通过一次扫描生成多对比度图像, 从以上图像中可获得弛豫定量参数: T1、T2 及质子密度(PD)等, SyMRI 兼具扫描效率与可重复性, 是椎间盘退变的早期、精确评估提供的新兴关键技术。合成 MRI 技术通过单次扫描即可同时获得多组定量弛豫参数, 有助于对髓核和纤维环进行亚区域差异化分析, 能够从分子水平敏感捕捉这些改变[23]。

张洧蓝等人[24]的研究结果显示, 合成 MRI 可定量评估腰椎间盘变性的 Pfirrmann 级别, 随退变程度加重, 髓核 T2 值呈进行性降低, 验证了 SyMRI 参数的高稳定性和纵向随访潜力。Jiang Y [25]比较了合成 MRI (MAGiC 序列)与传统 CPMG T2 mapping 方法在腰椎间盘退变定量评估中的可行性与效能。结果

显示,两种方法获得的 T2 值呈高度正相关( $r = 0.962, P < 0.01$ ),合成 MRI 在各分级间的鉴别效能(AUC)与传统 T2 mapping 无显著差异。研究同时指出,髓核 T2 值在 Pfirrmann I~IV 级的相邻组别间均存在显著差异( $P < 0.05$ ),能够客观反映髓核水分流失和生化成分改变。研究表明定量效能优于常规磁共振序列及单一 T2 mapping 技术,显示出替代专用 T2 mapping 序列的潜力。廖健伟等人的研究[26]纳入 126 例腰痛患者的 630 个腰椎间盘,采用集成 MRI (SyMRI)扫描,对所有椎间盘进行 Pfirrmann 分级,同时定量测量 T1、T2 和 PD 值。结果发现, SyMRI 测得的 T1、T2 及 PD 值与 Pfirrmann 分级之间存在显著相关( $P$ 均 $<0.05$ ),其中髓核 T2 值在各退变级别间的诊断效能最优。

## 5. H-MRS

氢质子磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)作为一种无创定量磁共振技术,近年来在椎间盘退变相关性腰痛的诊断与治疗决策中展现出独特价值,通过精准检测椎间盘内乳酸、脂质、蛋白聚糖相关代谢产物的特征波峰,反映椎间盘退变微环境中的缺氧、炎症及细胞外基质降解等病理改变,为椎间盘退变的早期诊断及临床决策提供客观分子依据。

Mallio 等[27]在其 2022 年的综述中指出, MRS 通过定量代谢特征可以识别与疼痛相关的化学标志物变化,可作为诊断退行性椎间盘疾病的重要新型磁共振工具。Gornet 等[28]发表于 2019 年的研究首次证实 MRS 的临床应用价值,该研究通过量化与椎间盘结构(胶原蛋白、蛋白聚糖)和酸度(乳酸、丙氨酸、丙酸盐)相关的波谱特征,构建了疼痛潜力评分(MRS-SCORE),并与椎间盘造影(provocative discography, PD)和 Pfirrmann 分级进行对照。提示 MRS 可作为预测手术获益的筛选工具。在此基础上, Gornet 等[29]的随访研究进一步表明 MRS 在长期预后评估中的价值。该研究发现 MRS 阳性组患者在腰椎融合术后 6 个月、12 个月及 24 个月的功能预后均显著优于对照组,强调了 MRS 在个性化手术规划中的重要价值。此后, Gornet 等[30]将 MRS 与传统低压力诱发椎间盘造影进行了比较,结果显示 MRS 识别化学性疼痛椎间盘的敏感性与特异性均达到与侵入性造影相当的水平,且因其无创、无并发症风险,被提出可作为评估椎间盘源性疼痛的“非侵入性金标准”。除了诊断与预后评估, Billham 等[31]初步临床观察还探索了 MRS 在保守治疗监测中的应用,发现一例对既往激素注射治疗无效的慢性椎间盘源性腰痛患者,脊柱手法治疗后部分患者椎间盘内生化学谱出现的改变,提示 MRS 有望作为疗效评价的客观影像学生物标志物。

MRS 可从早期代谢异常的识别,到疼痛椎间盘的精准定位,再到手术和保守治疗的疗效评估,正在逐步整合到椎间盘退变的临床决策路径中。未来需通过更大样本的前瞻性研究进一步优化标准化采集方案与量化分析流程,以推动其在椎间盘退变精准诊疗中的广泛应用。

## 6. MRE

磁共振弹性成像(MRE)是一种非侵入性的成像技术,通过分析剪切波在组织中的传播来量化组织刚度,可补充反映椎间盘的生物力学状态。

Walter 等[32]横断面研究中,对 47 例无腰痛受试者(230 个腰椎 IVD)于同一天早晚分别进行 MRE 扫描,评估髓核与纤维环的剪切刚度。结果显示 MRE 衍生剪切刚度具有良好的日内可重复性(髓核  $R = 0.92$ , 纤维环  $R = 0.83$ ),且随 Pfirrmann 退变等级升高而显著增加:髓核从 I 级( $12.5 \pm 1.3$  kPa)升至 V 级( $16.5 \pm 2.1$  kPa),纤维环从 I 级( $90.4 \pm 9.3$  kPa)升至 V 级( $120.1 \pm 15.4$  kPa),表明 MRE 剪切刚度可作为 IVD 退变的客观生物标志物。Cortes 等[33]利用 7T 全身 MRI 系统构建 MRE 平台,在完整人体椎骨-椎间盘-椎骨节段中测量髓核剪切模量,发现髓核剪切模量对椎间盘退变具有高度敏感性,且与常规 MRI 的 T2 弛豫时间等传统影像学生物标志物相比, MRE 能更直接地反映椎间盘组织的力学完整性。Co 等[34]研究发现,髓核组织的 MRE 剪切模量值与糖胺聚糖/湿重呈正相关、与水含量呈负相关,有力揭示了 MRE 检测水合

诱导的椎间盘剪切特性变化的能力，并阐明了髓核组织成分与剪切力学行为之间的结构-功能关系。未来研究应聚焦于标准化成像方案的建立与多中心大样本验证，以推动 MRE 真正转化为椎间盘退变早期诊断与疗效评估的临床工具。

## 7. 人工智能与定量 MRI

近年来，人工智能(AI)与定量 MRI 的融合，进一步推动椎间盘退变影像评估向自动化、标准化与智能化发展。在智能分割与定量测量方面，多模态 MRI 为椎间盘退变评估提供多维度数据基础，Möller 等 [35]提出的 SPINEPS 模型采用两阶段语义与实例分割方法，实现了 T2 加权 MR 图像上 14 类脊柱结构(含椎间盘)的全自动分割，在 1412 例大样本及多中心数据上 Dice 系数达 0.918~0.933，为髓核、纤维环等亚结构的定量参数自动化提取奠定了高精度解剖定位基础。基于精准分割，王瑜琳等[36]通过合成 MRI 定量序列测量椎间盘 T1、T2 及质子密度值，证实这些参数与 Pfirrmann 退变分级及腰痛 VAS 评分、ODI 功能障碍指数显著相关，为 AI 多参数融合诊断提供了影像-病理关联依据。在退变诊断与分级评估中，Minin 等[37]开发的 SpineScan 模型利用 YOLOv8x 架构同步实现腰椎间盘定位与 Pfirrmann 分级，其分级性能与高年资放射科医师高度一致，便于多中心验证与推广。为推动 AI 技术落地，中国医师协会等制定的《人工智能脊柱退变影像学测量位点与标注专家共识(2025)》[38]系统规范了 AI 在脊柱退变影像测量位点的标注标准，明确椎间盘高度、信号强度及 Pfirrmann 分级的量化方案，提升多中心数据一致性与模型泛化能力。所以，从全脊柱自动分割、定量参数验证到分级诊断与标准化共识，AI 与定量 MRI 的协同体系已初步形成，有望加快椎间盘退变精准定量评估的临床转化进程。

## 8. 小结

综上所述，上述定量 MRI 技术从灌注、扩散、弛豫、代谢及力学特性等维度，实现了对椎间盘退变过程的客观量化评估，且各类定量参数均与 IDD 细胞衰老、炎症反应、细胞外基质降解、终板营养障碍等核心病理生理机制紧密关联，说明临床对于椎间盘退变的评估已从传统的形态学观察，转向基于定量参数的精准诊断，而人工智能与定量 MRI 的融合，进一步实现了影像分析的自动化、精准化与智能化，极大推动了 IDD 定量诊断与病理机制研究的发展。未来研究应重点关注多模态定量 MRI 融合、标准化扫描方案与后处理流程的建立，为椎间盘退变的早期诊断、个性化治疗决策及疗效监测提供更可靠的影像学依据。

## 参考文献

- [1] Mohd Isa, I.L., Teoh, S.L., Mohd Nor, N.H. and Mokhtar, S.A. (2022) Discogenic Low Back Pain: Anatomy, Pathophysiology and Treatments of Intervertebral Disc Degeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article 208. <https://doi.org/10.3390/ijms24010208>
- [2] Knezevic, N.N., Candido, K.D., Vlaeyen, J.W.S., Van Zundert, J. and Cohen, S.P. (2021) Low Back Pain. *The Lancet*, **398**, 78-92. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)00733-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)00733-9)
- [3] Murto, N., Luoma, K., Lund, T. and Kerttula, L. (2023) Reliability of T2-Weighted Signal Intensity-Based Quantitative Measurements and Visual Grading of Lumbar Disc Degeneration on MRI. *Acta Radiologica*, **64**, 2145-2151. <https://doi.org/10.1177/02841851231169079>
- [4] Tamagawa, S., Sakai, D., Nojiri, H., Sato, M., Ishijima, M. and Watanabe, M. (2022) Imaging Evaluation of Intervertebral Disc Degeneration and Painful Discs—Advances and Challenges in Quantitative MRI. *Diagnostics*, **12**, Article 707. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12030707>
- [5] 赵海峰, 赵祥博, 杜雯娟, 等. MRI 在椎间盘退变导致的椎间盘源性下腰痛诊断与评估中的应用进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(9): 224-229.
- [6] Chen, S., Sun, D., Wang, N., Fang, X., Xi, Z., Wang, C., *et al.* (2023) Current Status and Trends in Quantitative MRI Study of Intervertebral Disc Degeneration: A Bibliometric and Clinical Study Analysis. *Quantitative Imaging in*

- Medicine and Surgery*, **13**, 2953-2974. <https://doi.org/10.21037/qims-22-1219>
- [7] Arpinar, V.E., Rand, S.D., Klein, A.P., Maiman, D.J. and Muftuler, L.T. (2015) Changes in Perfusion and Diffusion in the Endplate Regions of Degenerating Intervertebral Discs: A DCE-MRI Study. *European Spine Journal*, **24**, 2458-2467. <https://doi.org/10.1007/s00586-015-4172-y>
  - [8] Muftuler, L.T., Jarman, J.P., Yu, H.J., Gardner, V.O., Maiman, D.J. and Arpinar, V.E. (2015) Association between Intervertebral Disc Degeneration and Endplate Perfusion Studied by DCE-MRI. *European Spine Journal*, **24**, 679-685. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3690-3>
  - [9] Li, H., Yan, J., Chen, Y., Kang, W. and Huang, J. (2017) Non-Invasive Quantification of Age-Related Changes in the Vertebral Endplate in Rats Using *in Vivo* DCE-MRI. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **12**, Article No. 169. <https://doi.org/10.1186/s13018-017-0669-x>
  - [10] Sood, A., Mishra, G.V., Suryadevara, M., Parihar, P., Khandelwal, S., Manuja, N., *et al.* (2023) Role of Apparent Diffusion Coefficient in Evaluating Degeneration of the Intervertebral Disc: A Narrative Review. *Cureus*, **15**, e43340. <https://doi.org/10.7759/cureus.43340>
  - [11] Kapoor, R., Rangankar, V.P., Kumar, D., Raina, S., Revikumar, A. and Mohanan, K. (2023) Apparent Diffusion Coefficient and T2\* Mapping on 3T MRI in Normal and Degenerative Lumbar Intervertebral Discs. *Polish Journal of Radiology*, **88**, 275-285. <https://doi.org/10.5114/pjr.2023.128882>
  - [12] Shen, S., Wang, H., Zhang, J., Wang, F. and Liu, S. (2016) Diffusion Weighted Imaging, Diffusion Tensor Imaging, and T2\* Mapping of Lumbar Intervertebral Disc in Young Healthy Adults. *Iranian Journal of Radiology*, **13**, e30069. <https://doi.org/10.5812/iranjrad.30069>
  - [13] Stein, D., Assaf, Y., Dar, G., Cohen, H., Slon, V., Kedar, E., *et al.* (2021) 3D Virtual Reconstruction and Quantitative Assessment of the Human Intervertebral Disc's Annulus Fibrosus: A DTI Tractography Study. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 6815. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86334-8>
  - [14] Wei, Y., Hu, F., Sun, S., Kang, X. and Xi, Z. (2025) Feasibility Study for Evaluating Cervical Intervertebral Disc Degeneration Using Axial Diffusion Tensor Imaging. *European Spine Journal*, **34**, 479-486. <https://doi.org/10.1007/s00586-025-08660-z>
  - [15] Hansen, B. (2019) An Introduction to Kurtosis Fractional Anisotropy. *American Journal of Neuroradiology*, **40**, 1638-1641. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a6235>
  - [16] Barnes, N.A., Dkhar, W., Kadavigere, R., Sukumar, S., Pradhan, A., P.S., P., *et al.* (2025) Exploring Mean Kurtosis in MR Diffusion Kurtosis Imaging for Early Detection of Lumbar Spine Degeneration: A Systematic Review. *F1000Research*, **14**, Article 440. <https://doi.org/10.12688/f1000research.163638.1>
  - [17] Li, L., Zhu, W., Chen, W., *et al.* (2019) Diffusion Kurtosis Imaging Provides Quantitative Assessment of the Microstructure Changes of Disc Degeneration: An *in Vivo* Experimental Study. *European Spine Journal*, **28**, 1005-1013. <https://doi.org/10.1007/s00586-019-05924-3>
  - [18] Barnes, N., Dkhar, W., Kadavigere, R., Sukumar, S., K, V. and Pradhan, A. (2024) A Narrative Review of Diffusion Kurtosis MRI Parameters in Diagnosing Degenerative Spine Diseases in Animal Models. *Open Veterinary Journal*, **14**, 3181-3188. <https://doi.org/10.5455/ovj.2024.v14.i12.3>
  - [19] Barnes, N.A., Dkhar, W., Kadavigere, R., Sukumar, S., Vaishali, K., Pradhan, A., *et al.* (2026) Quantitative Assessment of Early Intervertebral Disc Degeneration with MR Diffusion Kurtosis Imaging: A Radiologic Correlation with Pfirrmann Grade. *Magnetic Resonance Imaging*, **127**, Article ID: 110592. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2025.110592>
  - [20] 李瑞梅, 王丹, 魏小二, 等. DCE-MRI 和 IVIM-DWI 对下腰痛患者退变椎间盘新生血管的研究[J]. 磁共振成像, 2018, 9(9): 667-672.
  - [21] 刘晨, 陈基明, 李勇, 等. MR 体素内不相干运动弥散加权成像评估腰椎间盘突出程度[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(2): 259-263.
  - [22] 靳苏日娜, 张维升. 磁共振功能和定量成像在腰椎间盘突出早期退变中应用的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2021, 31(11): 1043-1046.
  - [23] 张刚, 陈健, 常俊, 等. 影像学定量评估腰椎间盘突出退变的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2024, 34(7): 769-773.
  - [24] 张洵蓝, 朱婧怡, 徐晓晗, 等. 合成 MRI 技术对腰椎间盘突出变性级别的定量诊断研究[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(6): 621-626.
  - [25] Jiang, Y., Yu, L., Luo, X., Lin, Y., He, B., Wu, B., *et al.* (2020) Quantitative Synthetic MRI for Evaluation of the Lumbar Intervertebral Disk Degeneration in Patients with Chronic Low Back Pain. *European Journal of Radiology*, **124**, Article ID: 108858. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.108858>
  - [26] 廖健伟, 梁晓玲, 李葳, 等. 集成 MRI 对腰椎间盘突出退行性病变的诊断价值[J]. 中国研究型医院, 2024, 11(3): 44-48.
  - [27] Mallio, C.A., Vadalà, G., Russo, F., Bernetti, C., Ambrosio, L., Zobel, B.B., *et al.* (2022) Novel Magnetic Resonance

- Imaging Tools for the Diagnosis of Degenerative Disc Disease: A Narrative Review. *Diagnostics*, **12**, Article 420. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020420>
- [28] Gornet, M.G., Peacock, J., Claude, J., Schranck, F.W., Copay, A.G., Eastlack, R.K., *et al.* (2019) Magnetic Resonance Spectroscopy (MRS) Can Identify Painful Lumbar Discs and May Facilitate Improved Clinical Outcomes of Lumbar Surgeries for Discogenic Pain. *European Spine Journal*, **28**, 674-687. <https://doi.org/10.1007/s00586-018-05873-3>
- [29] Gornet, M.F., Eastlack, R.K., Peacock, J., Schranck, F.W. and Lotz, J.C. (2023) Magnetic Resonance Spectroscopy (MRS) Identification of Chemically Painful Lumbar Discs Leads to Improved 6-, 12-, and 24-Month Outcomes for Discogenic Low Back Pain Surgeries. *European Spine Journal*, **32**, 1973-1984. <https://doi.org/10.1007/s00586-023-07665-w>
- [30] Gornet, M.G., Peacock, J., Ryken, T., Schranck, F.W., Eastlack, R.K. and Lotz, J.C. (2024) Establishing a Gold Standard for Noninvasive Identification of Painful Lumbar Discs: Prospective Comparison of Magnetic Resonance Spectroscopy vs Low-Pressure Provocation Discography. *International Journal of Spine Surgery*, **18**, 91-100. <https://doi.org/10.14444/8574>
- [31] Billham, J.F., Shi, D., Evans Roland, E., Gornet, M.F., Brinkman, K.K., Schranck, F.W., *et al.* (2024) Intervertebral Disc Magnetic Resonance Spectroscopy Changes after Spinal Manipulative Therapy for Lumbar Discogenic Pain. *Cureus*, **16**, e72225. <https://doi.org/10.7759/cureus.72225>
- [32] Walter, B.A., Mageswaran, P., Mo, X., Boulter, D.J., Mashaly, H., Nguyen, X.V., *et al.* (2017) MR Elastography-derived Stiffness: A Biomarker for Intervertebral Disc Degeneration. *Radiology*, **285**, 167-175. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017162287>
- [33] Cortes, D.H., Magland, J.F., Wright, A.C. and Elliott, D.M. (2014) The Shear Modulus of the Nucleus Pulposus Measured Using Magnetic Resonance Elastography: A Potential Biomarker for Intervertebral Disc Degeneration. *Magnetic Resonance in Medicine*, **72**, 211-219. <https://doi.org/10.1002/mrm.24895>
- [34] Co, M., Raterman, B., Klamer, B., Kolipaka, A. and Walter, B. (2024) Nucleus Pulposus Structure and Function Assessed in Shear Using Magnetic Resonance Elastography, Quantitative MRI, and Rheometry. *JOR SPINE*, **7**, e1335. <https://doi.org/10.1002/jsp2.1335>
- [35] Möller, H., Graf, R., Schmitt, J., Keinert, B., Schön, H., Atad, M., *et al.* (2025) SPINEPS—Automatic Whole Spine Segmentation of T2-Weighted MR Images Using a Two-Phase Approach to Multi-Class Semantic and Instance Segmentation. *European Radiology*, **35**, 1178-1189. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11155-y>
- [36] 王瑜琳, 洪海惠, 王耀政, 等. 多模态 MRI 在腰椎间盘突出退变诊断中的应用研究[J]. 实用放射学杂志, 2024, 40(2): 266-269.
- [37] Minin, A., Leonova, O., Krutko, A., Elgaeva, E., Antonets, D., Shtokalo, D., *et al.* (2026) SpineScan: A Deep Learning Model for Lumbar Spine MRI Annotation and Pfirrmann Grading Assessment. *European Spine Journal*, **35**, 1261-1269. <https://doi.org/10.1007/s00586-025-09537-x>
- [38] 中国医师协会骨科医师分会智能骨科学组, 中华预防医学会脊柱疾病预防与控制专业委员会脊柱脊髓损伤疾病预防与控制学组. 人工智能脊柱退变影像学测量位点与标注专家共识(2025) [J]. 山东大学学报(医学版), 2026, 64(2): 1-10.