

❖ 骨骼肌肉影像学

Correlation of ultra-short echo time T2* mapping quantitative parameters with postoperative repair of achilles tendon rupture

CAO Yi¹, LIU Naiqian², WANG Hao¹, XU Guijun³, GUO Xinyi¹, GUO Lin^{1*}

(1. Department of Radiology, 3. Department of Traumatic Foot and Ankle Surgery, Tianjin Hospital, Tianjin University, Tianjin 300211, China; 2. School of Medical Technology, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China)

[Abstract] **Objective** To explore the correlations of ultra-short echo time (UTE) T2* mapping quantitative parameters with postoperative reparation of achilles tendon rupture (ATR). **Methods** Thirty-four male patients with ATR (ATR group) were prospectively enrolled. UTE T2* mapping examination, achilles tendon total rupture score (ATRS) and visual analogue scale (VAS) were performed before and at 1, 3, 6 and 12 months after operation. Thirty-five healthy male volunteers who underwent UTE T2* mapping were served as control group. Clinical scores and UTE T2* values of the ruptured achilles tendon at different time points were compared within ATR group, also between groups. Spearman correlation analyses were used to observe the correlations of UTE T2* values with ATRS and VAS at different follow-up time points. **Results** In ATR group, ATRS and VAS scores 1, 3, 6 and 12 months after operation were lower than those before operation (all $P < 0.05$). Postoperative ATRS decreased continuously among 1, 3, 6 and 12 months after operation (all $P < 0.001$). And except for 3 and 6 months after operation, significant differences of VAS were found between the other pairwise comparisons (all $P < 0.001$). UTE T2* value of the ruptured achilles tendon in ATR group 1 month postoperation was higher than that before operation ($P = 0.002$), which 3 months postoperation was lower than that 1 month postoperation ($P = 0.033$) but not significantly different from that before operation ($P = 0.989$). UTE T2* value of the ruptured achilles tendon 6 months postoperation was lower than that before operation, also 1 and 3 months postoperation (all $P < 0.001$). UTE T2* value of the ruptured achilles tendon 12 months after operation was the lowest (all $P < 0.001$). Six and 12 months after operation, UTE T2* values of the ruptured achilles tendon were moderately positively correlated with ATRS and VAS ($r = 0.506 - 0.697$, all $P < 0.05$). **Conclusion** Six and 12 months after ATR reparation, UTE T2* values of the ruptured achilles tendon were associated with postoperative repair status. UTE T2* mapping could provide quantitative references for noninvasive monitoring tendon repair.

[Keywords] achilles tendon rupture; postoperative period; magnetic resonance imaging; prospective studies; echo time; T2* mapping

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.019

跟腱断裂超短回波时间 T2* mapping 定量参数与术后跟腱修复的相关性

曹毅¹, 刘乃谦², 王皓¹, 徐桂军³, 郭欣怡¹, 郭林^{1*}

(1. 天津大学天津医院放射科, 3. 创伤足踝外科, 天津 300211; 2. 天津中医药大学医学技术学院, 天津 301617)

[摘要] **目的** 分析跟腱断裂(ATR)超短回波时间(UTE)T2* mapping 定量参数与术后跟腱修复的相关性。**方法** 前瞻性纳入 34 例男性 ATR 患者(ATR 组), 分别于跟腱修复术前及术后 1、3、6、12 个月行 UTE T2* mapping 检查、跟

[第一作者] 曹毅(1981—), 男, 天津人, 在读博士, 副主任技师。研究方向: MRI 技术、人工智能。E-mail: alexanderddr@163.com

[通信作者] 郭林, 天津大学天津医院放射科, 300211。E-mail: 510820850@qq.com

[收稿日期] 2025-12-26 **[修回日期]** 2026-03-06

腱完全断裂评分(ATRS)及疼痛视觉模拟评分(VAS);同时对 35 名健康男性志愿者(对照组)行 UTE T2* mapping 检查。比较 ATR 组内各时间点临床评分及断裂跟腱 UTE T2* 值,以及组间断裂跟腱 UTE T2* 值;采用 Spearman 相关分析观察各时间点 UTE T2* 值与 ATRS 及 VAS 的相关性。**结果** ATR 组术后 1、3、6、12 个月 ATRS 及 VAS 均低于术前($P < 0.05$);其中术后 1、3、6、12 个月 ATRS 持续下降($P < 0.001$),且除术后 3 个月与 6 个月外,其余时间点 VAS 两两比较差异均有统计学意义($P < 0.001$)。ATR 组术后 1 个月断裂跟腱 UTE T2* 值高于术前($P = 0.002$),术后 3 个月低于术后 1 个月($P = 0.033$)而与术前差异无统计学意义($P = 0.989$),术后 6 个月低于术前、术后 1 及 3 个月($P < 0.001$),至术后 12 个月为最低($P < 0.001$)。术后 6 及 12 个月,ATR 患者断裂跟腱 UTE T2* 值与 ATRS 及 VAS 均呈中度正相关($r = 0.506 \sim 0.697$, $P < 0.05$)。**结论** ATR 术后 6 及 12 个月,断裂跟腱 UTE T2* 值与修复情况存在关联;UTE T2* mapping 可为无创监测肌腱修复提供定量参考。

[关键词] 跟腱断裂;手术后期间;磁共振成像;前瞻性研究;回波时间;T2* mapping

[中图分类号] R686.1; R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)03-0414-05

跟腱系小腿三头肌(比目鱼肌、腓肠肌内外侧头)肌腱在足跟上方 15 cm 处融合而成,由 I 型胶原(占干质量 65%~80%)和其他胶原、蛋白多糖及水共同构成,血供主要来自胫后动脉返支,导致其正后方血供最差^[1]。跟腱断裂(achilles tendon rupture, ATR)好发于男性,其中约 80%发生于跟腱止点上方 5.0~8.4 cm 处,表现为胶原蛋白减少、蛋白多糖升高及含水量增加。ATR 修复术后跟腱恢复情况是临床关注重点,直接影响康复训练运动及恢复正常跟腱生物力学状态的时间。MR 具有软组织对比度优越、可任意体层成像、无电离辐射等优势,已成为影像学评估肌腱和韧带疾病的首选^[2];但其常规序列难以检测短 T2 组织信号,评估 ATR 的敏感度仅为 13%~79%^[3]。超短回波时间(ultra-short echo time, UTE)序列可采集更短 T2 组织信号、清晰显示肌腱和韧带走行^[4]并定量分析相关组织成分变化。本研究观察 ATR UTE T2* mapping 定量参数与术后跟腱修复程度的相关性。

1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性纳入 2024 年 8—12 月天津大学天津医院 34 例男性 ATR 患者(ATR 组),年龄 25~45 岁、平均(35.5±9.2)岁,平均体质量指数(body mass index, BMI)(25.18±3.14)kg/m²。纳入标准:①临床诊断 ATR 且相关资料完整;②无踝关节恶性肿瘤、转移瘤及放射/化学治疗史;③无踝关节骨折或其他外伤史;④分别于跟腱修复术前和术后 1、3、6 及 12 个月接受 UTE T2* mapping 检查、跟腱完全断裂评分(achilles tendon rupture score, ATRS)及疼痛视觉模拟评分(visual analog scale, VAS)^[5]。同时纳入 35 名男性健康志愿者作为对照组,年龄 25~42 岁、平均(32.6±6.2)岁,平均 BMI(24.12±3.34)kg/m²,均接受 UTE T2* mapping 检查且未见跟腱异常信号或结构损伤。排除标准:①MR 检查禁忌证;②图

像伪影重、质量差。本研究经院伦理委员会批准(2024 医伦审 252),检查前受试者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 嘱受试者检查前 2 h 避免踝关节剧烈运动。采用联影 MR u780 3.0T MR 仪、24 通道踝关节专用线圈进行下列扫描:①快速自旋回波(fast spin echo, FSE)矢状位 T1WI, TR 640 ms, TE 9.48 ms, FOV 160 mm×160 mm, 矩阵 352×282, 层厚 3.5 mm, 层间距 0.9 mm;②FSE 轴位及矢状位脂肪抑制质子密度加权成像(fat saturation-proton density weighted imaging, FS-PDWI), TR 1 800 ms, TE 33.24 ms, FOV 160 mm×160 mm, 矩阵 336×252, 层厚 3.5 mm, 层间距 0.9 mm;③梯度回波(gradient echo, GRE)UTE T2* mapping, TR 7.4 ms, TE 0.12/2.00/3.66 ms, FOV 200 mm×200 mm, 矩阵 224×224, 层厚 1 mm。

ATR 组患者均接受跟腱微创缝合术及术后康复训练,后者包括术后 1 个月内在防护步行靴下完成踝关节主动无负重运动,术后 3 个月内恢复正常行走、慢走和慢跑,术后 3~6 个月启动专项运动训练,以及术后 6 个月后计划恢复至伤前运动水平^[6]。

1.3 数据分析 将 3 组 UTE T2* mapping 回波图像传至联影后处理工作站,系统自动重建两次图像的减影图(图 1)。基于正中矢状位 UTE T2* 减影图,由具有 5 及 7 年工作经验的影像科医师各 1 名分别于跟腱断裂点向下 2 cm 处(近跟腱起止点)、跟腱断裂点及跟腱断裂点向上 2 cm 处勾画 1 cm² 的圆形 ROI(图 2),测量其 UTE T2* 值;连续测量 3 个层面,取平均值作为结果。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 25.0 统计分析软件。以 $\bar{x} \pm s$ 表示符合正态分布的计量资料,多组间行单因素重复测量方差分析及 Tukey's HSD 事后检验,对方差不齐的 2 组间数据比较行 Mann-Whitney U 检

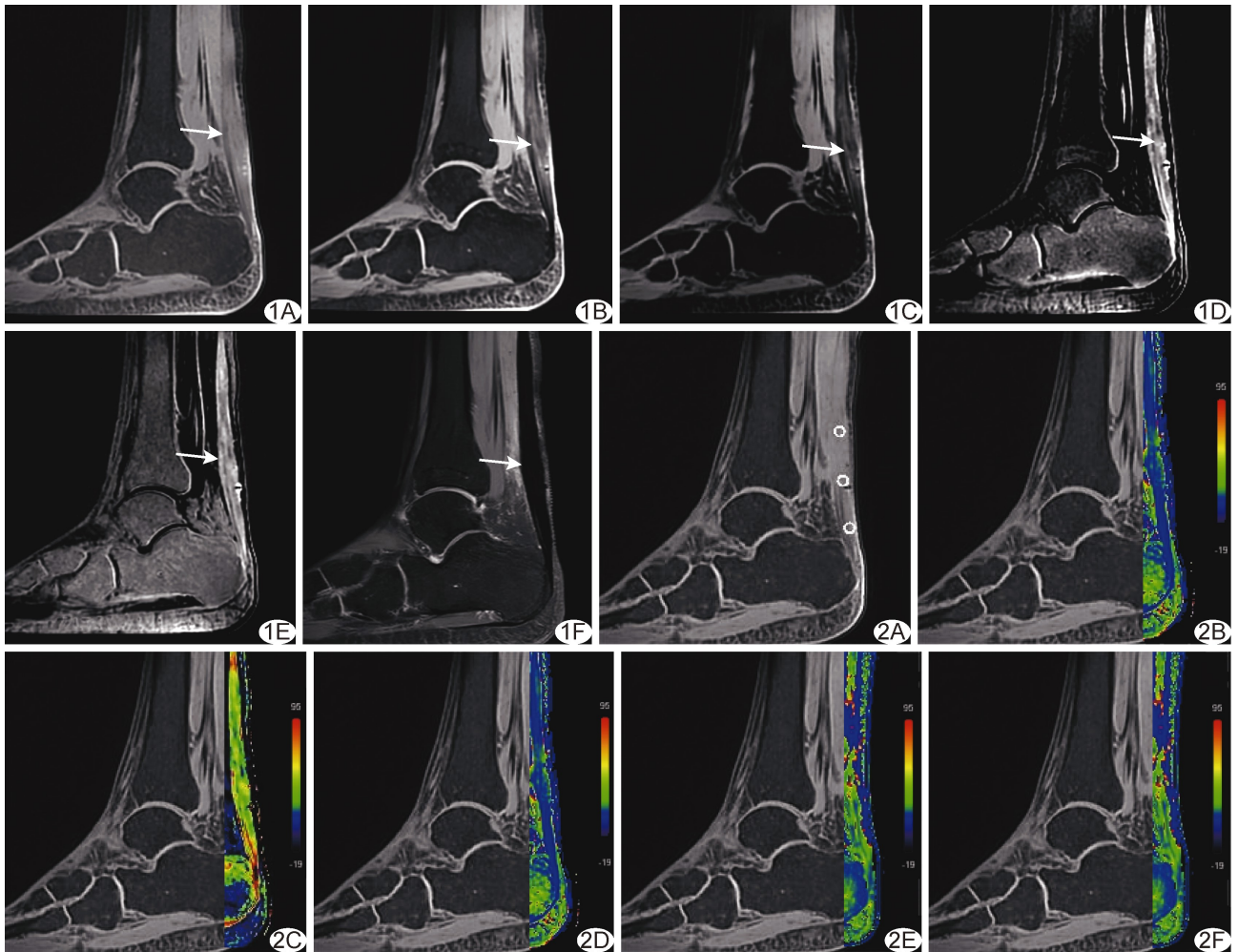


图 1 患者男,40 岁,ATR 术后 1 个月 A~C. TE 分别为 0.12(A)、2.00(B)、3.66(C) ms 的 T2* mapping 图示断裂肌腱呈高信号(箭); D、E. 减影图图 B-图 A(D)及减影图图 C-图 A(E)示断裂肌腱(箭); F. FS-PDWI 中断裂肌腱无信号(箭) 图 2 ATR 患者,男,40 岁 A. 于 UTE T2* mapping 图中勾画 ROI; B~F. 分别为术前和术后 1、3、6 及 12 个月 UTE T2* 减影伪彩图,术后 1 个月 UTE T2* 值信号强度最高,之后逐渐下降,术后 12 个月基本接近正常

验。采用 Spearman 相关分析观察各时间点 UTE T2* 值与 ATRS 及 VAS 的相关性: $|r| \geq 0.8$ 为高度相关, $0.5 \leq |r| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq |r| < 0.5$ 为低度相关, $|r| < 0.3$ 为弱相关。利用组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)评估重复测量的一致性: $ICC \geq 0.75$ 为一致性良好, ≥ 0.40 且 < 0.75 为一致性中等, < 0.40 为一致性差。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线资料 组间年龄、BMI 差异均无统计学意义(P 均 > 0.05)。对 34 例 ATR 均成功行跟腱修复术,随访期间未见感染、跟腱再断裂等不良事件。

2.2 临床评分纵向变化 ATR 组术后 1、3、6 及 12 个月 ATRS 及 VAS 均低于术前(P 均 < 0.05);其中,术后 1、3、6、12 个月 ATRS 持续下降(P 均 < 0.001),

且除术后 3 个月与 6 个月外,其余时间点 VAS 两两比较差异均有统计学意义(P 均 < 0.001)。见表 1。

表 1 34 例 ATR 患者手术前、后临床评分及断裂跟腱 UTE T2* 值

时间点	ATRS	VAS	断裂跟腱 UTE T2* 值(ms)
术前	84.00±6.65	8.00±0.85	33.30±7.91
术后 1 个月	77.10±6.41	7.00±0.72	37.03±6.90
术后 3 个月	63.10±11.90	5.94±1.12	34.06±6.51
术后 6 个月	40.90±10.00	5.00±1.01	27.80±6.76
术后 12 个月	16.70±5.22	2.44±1.03	7.89±3.78

2.3 UTE T2* 值比较 观察者间测量 UTE T2* 值结果的一致性中等($ICC=0.67$)。ATR 组术后 1 个月断裂跟腱 UTE T2* 值高于术前($P=0.002$);术后 3 个月断裂跟腱 UTE T2* 值低于术后 1 个月($P=0.033$)而与

术前差异无统计学意义 ($P=0.989$); 术后 6 个月断裂跟腱 UTE T2* 值低于术前、术后 1 及 3 个月 (P 均 <0.001); 术后 12 个月断裂跟腱 UTE T2* 值最低 (P 均 <0.001)。

各时间点 ATR 组断裂跟腱 UTE T2* 值均显著高于对照组 [(4.42±1.64)ms] (P 均 <0.001)。ATR 组术前及术后 6 个月 UTE T2* 值分布与对照组完全无重叠 ($U=0$); 至术后 12 个月, 2 组数据重叠程度明显增加 ($U=248, P<0.001$)。

2.4 相关性分析 术后 6 及 12 个月, ATR 患者断裂跟腱 UTE T2* 值与 ATRS 及 VAS 均呈中度正相关 ($r=0.506\sim0.697, P$ 均 <0.05)。见表 2。

3 讨论

传统 MR 序列主要基于半定量 Sugaya 分级分析肌腱修复信息, 其敏感度和特异度均有限^[7]。利用 UTE T2* mapping 成像可捕捉跟腱短 T2* 弛豫信号^[8-9], 以高效率和对比度直接显示跟腱超微结构纤维。既往研究^[10]基于 3D UTE 双 T2* 值区分正常跟腱与跟腱炎, 或采用脂肪抑制 UTE T2* 图观察韧带和肌腱生物组成及结构完整性。本研究基于断裂跟腱 UTE T2* 值及临床评分对术后跟腱变化进行为期 1 年的随访, 发现 UTE T2* 值可用于监测 ATR 术后肌腱修复过程。

由于 ATR 缝合处肌腱组织存在重叠, 本研究勾画 ROI 时, 额外测量断裂点下 2 cm (近跟腱起止点) 及向上 2 cm 处的 UTE T2* 值。术后跟腱修复过程中, 愈合部位会产生排列紊乱的胶原瘢痕组织, 随后胶原纤维重新发生排列和有序化。已有研究^[11]证实, 组织有序性越低、含水量越高, 则其 UTE T2* 值越高。ATR 术后 1 个月正值肉芽组织增生旺盛期和胶原重塑早期, 血管丰富、自由水含量高, 此时断裂肌腱 UTE T2* 值最高, 之后随胶原纤维成熟、脱水而逐渐下降。本研究 ATR 组术前及术后 6 个月 UTE T2* 值分布与对照组完全无重叠 ($U=0$), 至术后 12 个月 2 组数据重叠程度明显增加 ($U=248$), 提示即便术后 6 个月跟腱功能已有所改善、疼痛明显缓解, 但肌腱仍可能因炎症及日常活动负荷等因素影响而修复程度尚显不足^[12]; 术后 12 个月断裂跟腱 UTE T2* 值虽未达正常水平, 却已趋于健康状态, 但需更长时间随访进一步证实。

既往研究^[13]采用 UTE 定量动态监测业余马拉松运动员比赛前、后跟腱和股四头肌肌腱 UTE-磁化传

表 2 ATR 患者断裂跟腱 UTE T2* 值与 ATRS 及 VAS 评分的相关性

指标	术前		术后 1 个月		术后 3 个月		术后 6 个月		术后 12 个月	
	r 值	P 值	r 值	P 值	r 值	P 值	r 值	P 值	r 值	P 值
ATRS	-0.402	0.018	0.620	<0.001	0.185	0.296	0.558	<0.001	0.506	<0.001
VAS	0.761	<0.001	0.155	0.381	0.104	0.558	0.559	<0.001	0.696	<0.001

递率等参数变化, 发现赛后跟腱测值显著下降, 提示 UTE 磁化传递技术可用于监测运动 (即功能性负重) 前后肌腱微观结构的动态改变。本研究结果提示, 在 ATR 术后 1 及 3 个月的早期康复阶段, 由于个体康复训练及疼痛耐受力不同、断裂跟腱修复程度不同, 其 UTE T2* 值与临床评分未见显著相关; 而术后 6 及 12 个月, 断裂跟腱 UTE T2* 值与 ATRS 及 VAS 均呈中度正相关, 提示于 ATR 术后 6 个月、制定渐进式康复策略前监测断裂跟腱 UTE T2* 值具有一定临床意义。目前多数 ATR 康复方案允许患者在术后 6 个月时几乎完全恢复活动和日常劳动^[14-15]。

综上, ATR 术后 6 及 12 个月, 断裂跟腱 UTE T2* 值与其修复情况存在关联; UTE T2* mapping 可为无创监测肌腱修复提供定量参考。但本研究为单中心、小样本分析且缺乏病理学结果, 有待后续进一步观察。

利益冲突: 全体作者声明无利益冲突。

作者贡献: 曹毅撰写和修改文章; 刘乃谦查阅文献、数据分析; 王皓图像处理; 徐桂军研究实施; 郭欣怡图像分析; 郭林指导。

[参考文献]

- [1] 中华医学会骨科学分会创伤骨科学组, 中华医学会骨科学分会外固定与肢体重建学组, 国家骨科与运动康复临床医学研究中心, 等. 跟腱断裂临床循证诊疗指南 [J]. 中华骨与关节外科杂志, 2022, 15(5): 321-333.
- [2] 王倩, 吴艳波, 潘诗农, 等. 踝关节软骨损伤 3D-MRI 研究进展 [J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(5): 791-794.
- [3] 曹珊, 郭红红, 张皓. 超短回波时间和零回波时间 MRI 评估膝关节炎进展 [J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(10): 1587-1590.
- [4] 张旭阳, 于楠, 张喜荣, 等. 磁共振超短回波时间序列的应用研究进展 [J]. 磁共振成像, 2022, 13(2): 163-166.
- [5] 曹源, 崔增植, 赵杨, 等. 跟腱断裂疗效评价中所用评分量表的概述 [J]. 足踝外科电子杂志, 2022, 9(1): 118-123.
- [6] FENG S M, MAFFULLI N, OLIVA F, et al. Evidence-based clinical practice guidelines on the surgical management of acute achilles tendon rupture [J]. Br Med Bull, 2026, 157(1): 1daf026.
- [7] 陈俊, 楼珏翔, 徐国红, 等. 血清维生素 D 水平和肩袖撕裂修补术后疗效的相关性研究 [J]. 中国骨伤, 2022, 35(3): 225-232.
- [8] MOAZAMIAN D, DASKAREH M, ATHERTYA J S, et al.

- Quantitative ultrashort echo time magnetization transfer imaging of the osteochondral junction: An *in vivo* knee osteoarthritis study[J]. J Imaging, 2025, 11(6):198.
- [9] RAI P, JANU A K, SHETTY N, et al. Current landscape of short-T2 imaging techniques in the musculoskeletal system: The past, present and future [J]. J Magn Reson Imaging, 2025, 62(4):969-985.
- [10] NEWBURY N, SEDAGHAT S, ATHERTYA J S, et al. Novel fat suppression technique for ultrashort echo time MRI using single-point Dixon phase modeling [J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15(5):4580-4591.
- [11] PERERA M R, BYDDER G M, HOLDSWORTH S J, et al. Imaging and image processing techniques for high-resolution visualization of connective tissue with MRI: Application to fascia, aponeurosis, and tendon [J]. J Imaging, 2025, 11(2):43.
- [12] NIU F, MENG X, ZHU N, et al. Exploring the asynchronous changes of articular cartilage and osteochondral junction in knee osteoarthritis based on T2 mapping and ultrashort echo time imaging: A pilot study[J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15(5):4414-4430.
- [13] 朱诞恬, 方义杰, 吴文浩, 等. 超短回波时间磁化传递技术在业余马拉松运动员髌前肌腱动态监测中的应用 [J]. 中华放射学杂志, 2023, 57(12):1284-1289.
- [14] LEE S M, SEO Y G, PARK W H, et al. Preoperative rotator muscle strength ratio predicts shoulder function in patients after rotator cuff repair [J]. Orthop J Sports Med, 2020, 8(2):2325967119899346.
- [15] CHEN B, CHENG X, DORTHE E W, et al. Evaluation of normal cadaveric achilles tendon and enthesis with ultrashort echo time (UTE) magnetic resonance imaging and indentation testing[J]. NMR Biomed, 2019, 32(1):e4034.

2025 版中国科技期刊引证报告相关数据 ——《中国医学影像技术》

由中国科学技术信息研究所主持的“2025 中国科技论文统计结果发布会”于 2025 年 10 月 30 日在京举行。《中国医学影像技术》杂志在《2025 版中国科技期刊引证报告(核心版)》的相关数据为:

- 1 文献来源量:387 篇;
- 2 基金论文比:0.39;
- 3 核心总被引频次:2750;
- 4 核心影响因子:1.182;
- 5 学科扩散指标:15.31;
- 6 学科影响指标:1.00;
- 7 综合评价总分:60.4。