·5.0 T超高场磁共振成像专栏·

5.0 T超高场膝关节MRI的临床应用及其与3.0 T MRI的对比研究

刘苏卫 倪铭 李亚丽 江晨雨 袁慧书*

（北京大学第三医院影像科，北京 100191）

【摘要】 目的 评估5.0 T超高场MRI在膝关节病变成像中的应用效果，并与当前广泛使用的3.0 T MRI进行直接对比，以探讨其主要优势。**方法** 2023年12月至2024年8月期间招募健康对照者和慢性膝关节疼痛患者，所有受试者分别接受3.0 T和5.0 T膝关节MRI扫描。扫描序列包括T_1WI、2D FS_PDWI及3D FS_PDWI。3名肌肉骨骼放射科医生对图像质量进行独立评估。定量分析评估了肌肉、软骨及骨骼的信噪比（SNR），而半定量分析则对整体图像质量、诊断信心、伪影、脂肪抑制均匀性，以及软骨、韧带、半月板、骨髓水肿等关键结构的可视化效果进行了评估。统计学检验采用Wilcoxon符号秩检验，医生间一致性通过Fleiss kappa系数评估。**结果** 本研究共纳入48名健康对照者和55名慢性膝关节疼痛患者。定量分析显示，5.0 T MRI在所有序列中的肌肉、软骨及骨骼SNR均优于3.0 T（平均差值–1.1～–7.7，P<0.05）。半定量分析表明，5.0 T的2D序列图像质量优于3.0 T（平均差值–0.24～–0.50，P<0.05），但在3D PDWI矢状位中无明显优势（平均差值–0.12，P=0.054）。伪影和脂肪抑制均匀性方面，两者间差异不显著（P>0.05）。尽管5.0 T在阅片结果上未表现出明显优势，但其诊断信心显著提高（平均差值–0.14～–0.37，P<0.001），并在多种组织结构显像中表现更佳（平均差值–0.11～–0.35，P均<0.05）。3名医生的评估一致性达到中度至高度（kappa=0.486～0.969）。**结论** 与3.0 T MRI相比，5.0 T超高场MRI在膝关节成像中表现出显著优势，尤其在肌肉、软骨和骨骼的成像质量及诊断信心方面更为优越。5.0 T MRI在伪影和脂肪抑制均匀性方面未显示出劣势。然而，在3D PDWI图像质量上并无明显优势。5.0 T超高场MRI在小关节结构和微小病变的成像中具有较高的应用潜力，且在伪影和脂肪抑制均匀性方面表现良好。未来应进一步尝试提升3D PDWI图像质量。

【关键词】 磁共振成像；5.0 T；3.0 T；图像质量；膝关节

【中图分类号】 R445.2；R68 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202506003

Clinical application of 5.0 T ultra-high field knee joint MRI and comparative study with 3.0 T MRI

*Liu Suwei, Ni Ming, Li Yali, Jiang Chenyu, Yuan Huishu**

(Department of Radiology, Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China)

【Abstract】 Objective This study aims to evaluate the application of 5.0 T ultra-high-field MRI in knee joint imaging and directly compare its performance to the widely used 3.0 T MRI to explore its primary advantages. **Methods** This prospective study recruited healthy volunteers and patients with chronic knee pain between December 2023 and August 2024. All subjects underwent both 3.0 T and 5.0 T knee joint MRI scans. The imaging sequences included T1WI, 2D FS_PDWI, and 3D FS_PDWI sequences. Three musculoskeletal radiologists independently evaluated the image quality. Quantitative analysis measured the signal-to-noise ratio (SNR) of muscles, cartilage, and bone, while semi-quantitative analysis assessed overall image quality, diagnostic confidence, artifacts, homogeneity of fat suppression, and the visualization of knee structures, including cartilage, ligaments, menisci,

基金项目：国家重点研发计划重点专项（2023YFC2410703）

第一作者：刘苏卫，女，在读博士研究生，研究方向：骨肌系统疾病影像诊断及人工智能

通信作者：袁慧书，女，博士研究生，主任医师，研究方向：骨肌系统疾病影像诊断及人工智能

and bone marrow edema. Statistical analysis was conducted using the Wilcoxon signed–rank test, and inter–rater agreement was evaluated using the Fleiss kappa coefficient. **Results** A total of 48 healthy volunteers and 55 patients with chronic knee pain were included. Quantitative analysis showed that the SNR of muscles, cartilage, and bone in all sequences was significantly higher with 5.0 T MRI compared to 3.0 T (mean difference range –1.1 to –7.7, $P<0.05$). Semi–quantitative analysis indicated that the image quality of 5.0 T in 2D sequences was superior to 3.0 T (mean difference –0.24 to –0.50, $P<0.05$), whereas no significant advantage was observed for 3D PDWI sagittal imaging (mean difference –0.12, $P = 0.054$). There was no significant difference between 5.0 T and 3.0 T in terms of artifacts and homogeneity of fat suppression ($P>0.05$). Although 5.0 T did not show significant advantages in reading outcomes, it significantly improved diagnostic confidence (mean difference –0.14 to –0.37, $P<0.001$) and demonstrated superior imaging of various knee structures (mean difference –0.11 to–0.35, all $P<0.05$). The inter–rater agreement among the three radiologists ranged from moderate to high (kappa 0.486 to 0.969). **Conclusion** Compared with 3.0 T MRI, 5.0 T ultra–high–field MRI demonstrated significant advantages in knee joint imaging, particularly in the quality of muscle, cartilage, and bone imaging as well as in diagnostic confidence. Additionally, 5.0 T did not show any disadvantages in terms of artifact control and fat suppression uniformity. However, no significant advantage was noted in 3D PDWI image quality.

【**Key words**】 Magnetic resonance imaging; 5.0 T; 3.0 T; Image quality; Knee joint

膝关节疾病的病因复杂，且具有较高的发病率及致残率[1]。若患者未能得到及时有效的临床诊断和治疗，往往会导致进行性运动功能障碍，严重影响生活质量并加剧经济负担[2]。MRI因其无创、无辐射的特点，尤其在软组织成像方面具有独特的优势，已广泛应用于膝关节疾病的诊断[3]。目前，1.5 T和3.0 T MRI在临床中应用广泛，但其在空间分辨率和对比度方面存在一定局限性[4]。

7.0 T超高场MRI凭借其超高分辨率，在骨肌系统细微结构的观察和早期病变诊断中展现出巨大潜力[5-6]。已有研究证实，7.0 T超高场MRI在膝关节[5, 7]、髋关节[8]、腕关节[6, 9]及踝关节[10]的软骨成像中具有显著优势。然而，由于7.0 T超高场MRI的高成本、低普及性及潜在的安全性问题等，尚未在临床中得到广泛使用[11]。

目前，美国食品和药物管理局（Food and Drug Administration, FDA）已批准5.0 T超高场MRI系统用于临床检查[6]。作为介于3.0 T和7.0 T之间的新技术，5.0 T MRI在磁场强度和全身磁场均匀性之间取得了平衡，然而，随着场强的增加，超高场MRI固有的物理学挑战也不容忽视。例如，共振频率的提高导致射频波长缩短，可能引发介电效应（dielectric effects）及B1场不均匀性；同时，比吸收率（specific absorption ratio, SAR）的升高对扫描序列的安全性设计提出了更严格的要求，而组织间磁敏感差异的放大也可能加剧局部伪影。尽管如此，随着多通道发射线圈技术及并行采集算法的进步，5.0 T MRI在具备相对较低的成本和良好的使用安全性的基础上，也在提升膝关节图像质量和诊断能力方面展现出潜力[12-14]。然而，关于3.0 T MRI和5.0 T超高场MRI在膝关节检查中临床差异性的对比研究仍然较少[15]。因此，5.0 T MRI在常规临床环境中对膝关节成像的适用性值得进一步探讨。

本研究通过定量对比3.0 T和5.0 T MRI在膝关节肌肉、软骨及骨骼组织中的信噪比表现，并通过半定量评估两者在图像质量、诊断信心、伪影、脂肪抑制均匀性，以及软骨、韧带、半月板、骨髓水肿等膝关节重要结构及病理状态的可视化效果上的差异，旨在证实5.0 T超高场MRI在小关节结构和微小病变成像中的应用潜力。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究为前瞻性研究，已获得北京大学第三医院伦理委员会批准（批件号：M2024137）。于2023年12月至2024年8月期间，通过在医院张贴海报的方式招募研究对象，包括一组慢性膝关节疼痛患者和一组健康对照者。所有受试者均签署了书面知情同意书，符合《赫尔辛基宣言》要求。纳入标准：①自愿签署知情同意书的膝关节正常及患病人群；

②年龄在18～80岁之间。排除标准：①近6个月内有外伤史、膝关节手术史、炎症性关节炎病史；②无法进行3.0 T或5.0 T MRI检查如有幽闭恐惧症或体内金属置入物。共招募120例参与者，包括60例健康对照者和60例慢性膝关节疼痛患者。由于MRI检查禁忌证或既往病史等原因，6例健康志愿者和3例患者在研究开始前被排除。另有6例健康志愿者和2例患者因时间限制未能完成5.0 T MRI检查。最终，共有48例健康对照者和55例慢性膝关节疼痛患者完成本研究，见图1。

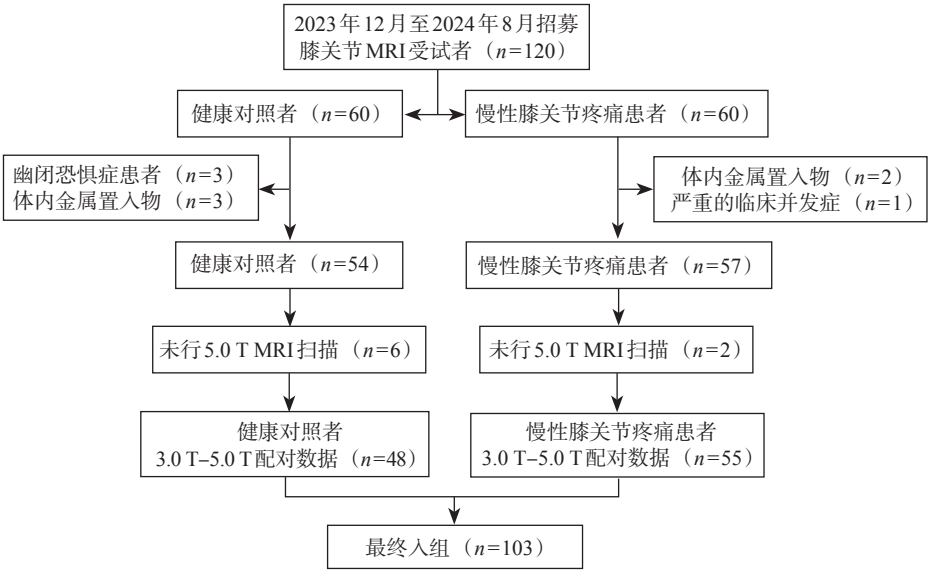


图1 患者纳入流程

1.2 3.0 T MRI和5.0 T MRI扫描参数

所有受试者在联影5.0 T Jupiter全身磁共振扫描仪及联影3.0 T UI 880i扫描仪上进行扫描，均配备24通道发射–接收一体膝关节线圈。扫描序列包括2D矢状位T_1WI、矢状位FS_PDWI、冠状位FS_PDWI、轴位FS_PDWI以及3D矢状位FS_PDWI。详细MRI参数见表1。

表1 3.0 T MRI和5.0 T MRI扫描参数

参数	3.0 T扫描					5.0 T扫描				
	T_1 FSE	PD FSE	PD FSE	PD FSE	PD FSE	T_1 FSE	PD FSE	PD FSE	PD FSE	PD FSE
维度	2D	2D	2D	2D	3D	2D	2D	2D	2D	3D
采集方位	矢状位	矢状位	冠状位	轴位	矢状位	矢状位	矢状位	冠状位	轴位	矢状位
重复时间（ms）	600	2 800	2 800	2 800	1 000	702	2 800	2 800	2 800	1 200
回波时间（ms）	7.40	41.30	41.30	41.30	86.72	8.36	19.88	19.88	19.88	37.80
带宽（Hz）	300	230	230	230	350	240	180	180	180	450
反转角（°）	130	130	130	130	72	110	120	120	120	450
相位编码方向	FH	FH	RL	RL	AP	FH	FH	RL	RL	AP
扫描野（mm）	160×160	160×160	160×160	160×160	164×164	160×160	160×160	160×160	160×160	160×160
矩阵	320×320	320×320	320×320	320×320	272×272	384×384	384×384	384×384	384×384	288×288
层厚（mm）	3.5	3.5	3.5	3.5	0.4	3.5	3.5	3.5	3.5	0.3
层间距（mm）	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	2.0
回波链长度（个）	3	7	7	7	45	3	7	7	7	44
加速技术	FAST/1D	FAST/1D	FAST/1D	FAST/1D	FAST/ACS	FAST/1D	FAST/1D	FAST/1D	FAST/1D	FAST/ACS
加速因子	2	2	2	2	5(8.54)	2	2	2	2	4(5.78)
平均采集时间	1min26s	1min38s	1min38s	1min38s	5min1s	1min31s	1min43s	1min43s	1min43s	4min52s

注：FSE为快速自旋回波（fast spin–echo）；PD为质子密度（proton density）；FH为头足（feet head）；RL为左右（right–left）；AP为前后（anteroposterior）；ACS为自动校准信号（auto–calibration signal）。

1.3 MRI评估

所有图像均由具有10年以上肌肉骨骼MRI经验的放射科医生阅片。研究病例均已匿名化处理，阅片医生对慢性膝关节疼痛患者的病史和临床症状均不知情。在正式评估前，进行了2 h的校准会，使用10例未纳入本研究的图像进行示例，以确保评估一致性。阅片医生可以选择个性化的窗位、放大倍数和滚动方式以便于评估。

1.3.1 定量评估

针对3.0 T和5.0 T的2D和3D快速自旋回波序列图像，由3名阅片医生独立选择感兴趣区（region of interest, ROI），对所有膝关节的骨骼、软骨和肌肉进行信噪比（signal to noise ratio, SNR）估计。软骨、肌肉和骨骼的信噪比（SNRc、SNRm、SNRb）计算方法为各组织平均信号强度除以背景噪声的标准差。背景噪声通过在远离被检组织、无可见解剖结构及伪影的图像空白区域放置ROI获得，且该ROI的位置选择在3.0 T与5.0 T图像中保持一致。

1.3.2 半定量评估

每名阅片医生对每个3.0 T和5.0 T序列图像的总体图像质量、诊断信心、伪影及脂肪抑制均匀性进行评估[16-17]。采用Likert 5级评分法，1分 = “不可用于诊断/伪影严重，无法进行诊断/脂肪抑制不足或失败”；2分 = “图像质量较差/伪影严重/明显脂肪抑制不均匀，影响多个关节组织的评估”；3分 = “图像质量尚可/中度伪影/轻度脂肪抑制失败，影响部分关节组织的评估”；4分 = “图像质量良好/轻度伪影/视野范围内脂肪抑制几乎均匀，且不影响组织评估”；5分 = “图像质量极佳/无明显伪影/脂肪抑制效果极佳”。为了避免识别偏差，将3.0 T和5.0 T数据混合并打乱顺序，分为两组并间隔4周进行评估。

阅片医生还根据Likert 5级量表对膝关节各重要结构包括前后交叉韧带、内外侧副韧带、髌腱、半月板、骨髓水肿、股骨髁、胫骨平台、髌骨软骨的可视化效果进行评分。

1.4 统计学分析

采用R 4.0.2和Medcalc软件完成数据统计分析。性别、检查方位等分类变量采用频数（n）表示。年龄和体质指数（body mass index, BMI）等连续变量采用均值 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，采用独立样本Wilcoxon秩和检验评估组间差异。SNR、图像质量、诊断信心、伪影及脂肪抑制均匀性在3.0 T和5.0 T之间的差异通过Wilcoxon符号秩检验分析。定量及半定量分析结果以3.0 T和5.0 T之间的差值（均值 ± 标准差）表示，平均差值为负值表示5.0 T MRI值较大，正值则表示3.0 T MRI值较大。对于慢性膝关节疼痛患者的3.0 T和5.0 T诊断结果的比较分析使用Wilcoxon符号秩检验。阅片医生间一致性采用Fleiss kappa进行判断，kappa值介于0.41 ~ 0.60之间表示中度一致性，介于0.61 ~ 0.80之间表示强一致性，介于0.81 ~ 1.00之间表示几乎完美一致性。以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 受试者特征

慢性膝关节疼痛患者平均年龄为（58.0 ± 8.0）岁，显著高于健康对照者的（51.0 ± 9.0）岁（P<0.001）。慢性膝关节疼痛患者中，男性16名，女性39名，健康对照者中，男性14名，女性34名；慢性膝关节疼痛患者的BMI为（24.2 ± 3.4）kg/m²，健康对照者的BMI为（23.5 ± 2.9）kg/m²；慢性膝关节疼痛患者中，检查方位为左膝关节的有28例，右膝关节的有27例；健康对照者中，检查方位为左膝关节的有23例，右膝关节的有25例，两组的性别、BMI、检查方位比较，差异均无统计学意义（P>0.05）。

2.2 定量分析

5.0 T MRI在所有序列的肌肉SNR（SNRm）优于3.0 T MRI，平均差值范围为–2.8 ~ –6.7（P<0.05）；5.0 T的软骨SNR（SNRc）显著优于3.0 T，平均差值范围为–2.0 ~ –7.7（P<0.001）；5.0 T的骨骼SNR（SNRb）也显著优于3.0 T，平均差值范围为–1.1 ~ –6.1（P<0.001）。5.0 T和3.0 T各序列下的SNRm、SNRc和SNRb在健康对照者和慢性膝关节疼痛患者之间未表现出显著差异（P>0.05）。

2.3 半定量分析

在图像质量方面，5.0 T MRI的2D序列的图像质量均显著优于3.0 T MRI，平均差值范围

为–0.24 ~ –0.50（P <0.05），而 3D 质子密度加权成像（proton density weighted imaging, PDWI）矢状位在 5.0 T MRI未发现明显优势，平均差值为–0.12（P =0.054）；5.0 T MRI所有序列的诊断信心均显著优于 3.0 T MRI，平均差值范围为–0.14 ~ –0.37（P <0.001）；尽管 5.0 T MRI的伪影和脂肪抑制均匀性较 3.0 T 更佳，但二者差异无统计学意义，平均差值范围分别为–0.01 ~ –0.07、–0.04 ~ –0.08（P 均 >0.05），见表 2。图 2 为一名 57 岁女性慢性膝关节疼痛患者的 MRI 图像，3.0 T（图 2A—图 2D）与 5.0 T（图 2E—图 2H）图像对比可知，5.0 T 图像能更好显示髌骨软骨下骨囊肿和骨髓结构。

表 2 3.0 T MRI 与 5.0 T MRI 肌肉、软骨、骨骼信噪比定量分析及图像质量、诊断信心、伪影和脂肪抑制均匀性半定量分析结果（$\bar{x} \pm s$）

序列	SNRm	SNRc	SNRb	图像质量	诊断信心	伪影	脂肪抑制均匀性
T_1WI 矢状位	–6.7 ± 37.6	–7.7 ± 13.3	–2.4 ± 6.4	–0.50 ± 0.70	–0.28 ± 0.50	–0.01 ± 0.30	—
P 值	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.739	—
PDWI 矢状位	–3.0 ± 9.3	–2.6 ± 3.6	–4.2 ± 2.3	–0.50 ± 0.50	–0.37 ± 0.70	–0.07 ± 0.30	–0.08 ± 0.40
P 值	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052	0.130
PDWI 冠状位	–5.3 ± 6.6	–2.0 ± 1.8	–2.8 ± 1.6	–0.32 ± 0.80	–0.24 ± 0.50	–0.05 ± 0.40	–0.06 ± 0.50
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190	0.120
PDWI 轴位	–4.2 ± 6.6	–4.3 ± 5.0	–6.1 ± 2.0	–0.24 ± 0.50	–0.14 ± 0.40	–0.02 ± 0.30	–0.05 ± 0.50
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.480	0.160
3D PDWI 矢状位	–2.8 ± 8.0	–2.1 ± 6.1	–1.1 ± 2.4	–0.12 ± 0.60	–0.21 ± 0.40	–0.01 ± 0.20	–0.04 ± 0.60
P 值	0.001	0.000	0.000	0.054	0.000	0.560	0.100

注：分析结果以均差 ± 标准差表示，平均差值为负值表示 5.0 T MRI 值较大，正值表示 3.0 T MRI 值较大；—表示无数据；T_1WI 为 T_1 加权成像；PDWI 为质子密度加权成像；SNRm 为肌肉信噪比；SNRc 为软骨信噪比；SNRb 为骨骼信噪比。

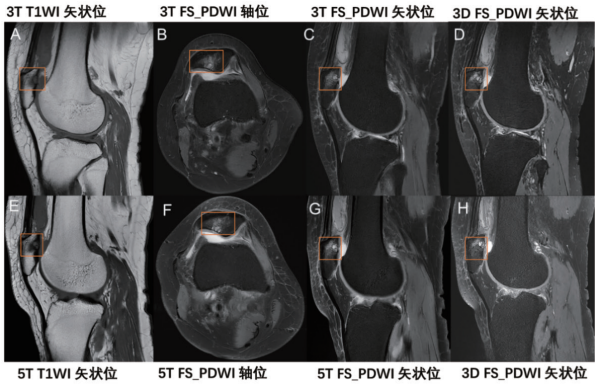


图 2 一名慢性膝关节疼痛患者的髌骨 MRI 图像 A—D 为 3.0 T 图像；E—H 为 5.0 T 图像

注：与 3.0 T 图像相比，5.0 T 图像能更好显示髌骨软骨下骨囊肿和骨髓结构。

在膝关节各重要结构的可视化效果评估中，5.0 T MRI的评分显著优于 3.0 T MRI，平均差值范围为–0.11 ~ –0.35（P 均 <0.05），见表 3。

2.4 阅片者间一致性

3 名阅片医生在 3.0 T MRI 和 5.0 T MRI 上对肌肉、软骨及骨骼的 SNR 和图像质量、诊断信心、伪影、脂肪抑制均匀性的评估一致性 kappa 值在 0.486 ~ 0.969 之间，显示中度到高度的一致性，见表 4。

表 3 3.0 T MRI 与 5.0 T MRI 下膝关节各重要结构可视化效果评分结果及阅片者间一致性分析

解剖结构	可视化效果		Fleiss kappa 值		
	评分（$\bar{x} \pm s$）	P 值	3.0 T	5.0 T	P 值
股骨内侧髁软骨	–0.32 ± 1.70	0.004	0.876	0.934	0.032
股骨外侧髁软骨	–0.10 ± 0.70	0.036	0.834	0.912	0.030
胫骨内侧平台软骨	–0.24 ± 0.90	0.026	0.856	0.922	0.251
胫骨外侧平台软骨	–0.26 ± 0.80	0.003	0.879	0.911	0.045
髌骨软骨	–0.11 ± 0.60	0.046	0.789	0.903	0.001
内侧半月板	–0.16 ± 0.70	0.017	0.765	0.799	0.056
外侧半月板	–0.24 ± 0.80	0.013	0.734	0.707	0.663
前交叉韧带	–0.35 ± 0.70	<0.001	0.763	0.811	0.050
后交叉韧带	–0.23 ± 0.70	0.004	0.901	0.934	0.068
内侧副韧带	–0.22 ± 0.60	0.001	0.763	0.826	0.046
外侧副韧带	–0.22 ± 0.80	0.005	0.721	0.833	0.017
髌腱	–0.10 ± 0.60	0.037	0.956	0.969	0.067
股骨骨髓	–0.20 ± 0.60	0.003	0.919	0.969	0.051
胫骨骨髓	–0.20 ± 0.60	0.016	0.855	0.872	0.053
髌骨骨髓	–0.10 ± 0.60	0.033	0.914	0.918	0.088

注：评分结果以均差 ± 标准差表示，平均差值为负值表示 5.0 T MRI的评分较高，正值表示 3.0 T MRI的评分较高；Fleiss kappa 值用于评估阅片者间一致性，其中，0.41 ~ 0.60 表示中度一致性，0.61 ~ 0.80 表示强一致性，0.81 ~ 1.00 表示几乎完美一致性。

表4 3.0 T MRI与5.0 T MRI下SNR、图像质量、诊断信心、伪影及脂肪抑制均匀性的阅片者间一致性分析

序列	Fleiss kappa值						
	SNRm	SNRc	SNRb	图像质量	诊断信心	伪影	脂肪抑制均匀性
T_1WI 矢状位							
3.0 T	0.623	0.653	0.641	0.678	0.699	0.612	—
5.0 T	0.656	0.687	0.653	0.771	0.623	0.643	—
*P*值	0.067	0.064	0.056	0.032	0.051	0.052	—
PDWI 矢状位							
3.0 T	0.631	0.613	0.656	0.745	0.617	0.669	0.734
5.0 T	0.681	0.607	0.640	0.622	0.676	0.612	0.776
*P*值	0.057	0.076	0.071	0.024	0.053	0.051	0.050
PDWI 冠状位							
3.0 T	0.646	0.623	0.661	0.671	0.673	0.759	0.732
5.0 T	0.606	0.534	0.601	0.782	0.692	0.746	0.719
*P*值	0.054	0.611	0.056	0.033	0.078	0.121	0.217
PDWI 轴位							
3.0 T	0.775	0.714	0.778	0.766	0.812	0.753	0.773
5.0 T	0.743	0.728	0.792	0.834	0.825	0.710	0.764
*P*值	0.051	0.267	0.053	0.048	0.199	0.064	0.652
3D PDWI 矢状位							
3.0 T	0.611	0.601	0.622	0.623	0.623	0.667	0.666
5.0 T	0.686	0.585	0.616	0.611	0.606	0.601	0.603
*P*值	0.176	0.156	0.319	0.281	0.045	0.058	0.050

注：Fleiss kappa值用于评估阅片者间一致性，其中，0.41 ~ 0.60表示中度一致性，0.61 ~ 0.80表示强一致性，0.81 ~ 1.00表示几乎完美一致性；—表示无数据；T_1WI 为T_1加权成像；PDWI为质子密度加权成像；SNRm为肌肉信噪比；SNRc为软骨信噪比；SNRb为骨骼信噪比。

3 讨论

目前，尚缺乏3.0 T和5.0 T MRI在膝关节图像及组织结构中的定量与半定量评估对比研究。我们的研究初步完成了对健康对照者和慢性膝关节疼痛患者的3.0 T和5.0 T MRI图像的SNR、图像质量、诊断信心、伪影、脂肪抑制均匀性以及软骨、韧带、半月板、骨髓水肿等膝关节重要结构半定量评估的对比分析。

定量分析结果显示，5.0 T MRI在所有序列中的软骨、肌肉及骨骼SNR均优于3.0 T，平均差值范围为–1.1 ~ –7.7（P <0.05）；且健康对照者和慢性膝关节疼痛患者在5.0 T MRI下的组织SNR无显著差异，这表明5.0 T MRI的磁场优势以及其成像的重复性和一致性较高。

定性研究中，尽管采用相同的24通道收发一体线圈并保持相似的扫描时间，5.0 T在2D序列中的图像质量显著优于3.0 T，平均差值范围为–0.24 ~ –0.50（P<0.05），但在3D PDWI矢状位中趋势未达显著，平均差值为–0.12（P=0.054）。这一现象也反映了3D采集对伪影效应、信号饱和以及均匀磁场的更高要求[18–19]，更强调了不同磁场强度下成像参数优化的重要性。

此外，5.0 T MRI在各个序列中的伪影（平均差值范围为–0.01 ~ –0.07，P>0.05）和脂肪抑制均匀性（平均差值范围为–0.04 ~ –0.08，P >0.05）与3.0 T相比并无显著加重。通常情况下，磁场强度的增加可能加剧伪影和脂肪抑制不均匀性[5–6]。然而，本研究的结果表明，5.0 T超高场MRI在提高SNR的同时能够有效控制伪影和脂肪抑制均匀性问题，这可能与成像条件和扫描线圈设计相关。

尽管5.0 T MRI在诊断结果上未表现出明显优势，但对膝关节疾病的诊断信心显著提升，平均差值范围为–0.14 ~ –0.37（P <0.001），并在各组织结构的显示上表现出优势，平均差值范围为–0.11 ~ –0.35（P 均 <0.05），这表明超高场MRI在膝关节成像中具备潜在临床应用价值。因此，5.0 T膝关节MRI在提升微细结构显示和支持诊断评估方面具有潜在应用价值。

在3.0 T和5.0 T MRI下，3名阅片者在肌肉、软骨及骨骼SNR、图像质量、诊断信心、伪影、脂肪

抑制均匀性以及软骨、韧带、半月板、骨髓水肿等膝关节重要结构的评估一致性结果方面，kappa值在0.486 ~ 0.969之间，表明阅片者之间具有中到高的一致性[20]。较高的kappa值表明不同阅片者对膝关节成像特征的判断具有较高一致性，从而提升了MRI在关节诊断中的可靠性。Prener等[21]在研究7.0 T和3.0 T MRI下的弥漫性低级别胶质瘤总肿瘤体积差异时发现，随着磁场强度增加及成像技术优化，不同阅片者间的一致性有所提升。这为高场强MRI在关节病变诊断中的应用提供了支持。

本研究存在一定局限性。首先，慢性膝关节疼痛患者数量较少，可能限制了对膝关节MRI结果的临床推广性解释，需要更大样本量验证。其次，未能提供MRI结果的客观参考标准（如关节镜），但本研究的主要目的在于通过3名阅片者的评价比较3.0 T和5.0 T的图像质量，而非诊断准确性。再次，本研究中5.0 T MRI使用的序列基于3.0 T成像标准进行了优化，以保证测量时间的可比性。

综上所述，5.0 T超高场MRI在膝关节成像中较3.0 T MRI表现出显著的潜在优势，尤其在细节成像方面具有更高的信噪比和细节表现。本研究显示，5.0 T MRI在伪影和脂肪抑制均匀性方面未表现出显著劣势，确保了成像的稳定性。然而，5.0 T的3D PDWI图像质量未显示出明显优势。未来研究有必要针对5.0 T超高场成像特点，从工程与序列层面进一步优化3D PDWI成像性能，包括改进线圈设计以提升接收效率，结合场强特性对扫描参数如TR、TE进行针对性调整，优化SAR管理策略，并引入人工智能辅助图像重建方法以增强信噪比并抑制噪声放大效应，从而更充分地释放5.0 T超高场MRI在膝关节成像中的潜力。

[参 考 文 献]

[1] Mahmoudian A, Lohmander L S, Mobasheri A, et al. Early-stage symptomatic osteoarthritis of the knee-time for action[J]. Nat Rev Rheumatol, 2021, 17(10): 621-632.

[2] Nacey N C, Geeslin M G, Miller G W, et al. Magnetic resonance imaging of the knee: an overview and update of conventional and state of the art imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 45(5): 1257-1275.

[3] Johnson P M, Lin D J, Zbontar J, et al. Deep learning reconstruction enables prospectively accelerated clinical knee MRI[J]. Radiology, 2023, 307(2): e220425.

[4] Friebe B, Richter M, Penzlin S, et al. Assessment of low-grade meniscal and cartilage damage of the knee at 7T: a comparison to 3T imaging with arthroscopic correlation[J]. Invest Radiol, 2018, 53(7): 390-396.

[5] Regatte R R, Schweitzer M E. Ultra-high-field MRI of the musculoskeletal system at 7.0T[J]. J Magn Reson Imaging, 2007, 25(2): 262-269.

[6] Heiss R, Weber M A, Balbach E, et al. Clinical application of ultrahigh-field-strength wrist MRI: a multireader 3-T and 7-T comparison study[J]. Radiology, 2023, 307(2): e220753.

[7] Springer E, Bohndorf K, Juras V, et al. Comparison of routine knee magnetic resonance imaging at 3T and 7T[J]. Invest Radiol, 2017, 52(1): 42-54.

[8] Chang G, Deniz C M, Honig S, et al. MRI of the hip at 7T: feasibility of bone microarchitecture, high-resolution cartilage, and clinical imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 39(6): 1384-1393.

[9] Chang G, Friedrich K M, Wang L, et al. MRI of the wrist at 7 tesla using an eight-channel array coil combined with parallel imaging: preliminary results[J]. J Magn Reson Imaging, 2010, 31(3): 740-746.

[10] Jin J, Weber E, Destruel A, et al. An open 8-channel parallel transmission coil for static and dynamic 7T MRI of the knee and ankle joints at multiple postures[J]. Magn Reson Med, 2018, 79(3): 1804-1816.

[11] Hoff M N, Mckinney Ⅳ A, Shellock F G, et al. Safety considerations of 7-T MRI in clinical practice[J]. Radiology, 2019, 292(3): 509-518.

[12] Zhang Y, Yang C, Liang L, et al. Preliminary experience of 5.0T higher field abdominal diffusion-weighted MRI: agreement of apparent diffusion coefficient with 3.0T imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 56(4): 1009-1017.

[13] Zhang Y, Sheng R, Yang C, et al. Higher field reduced FOV diffusion-weighted imaging for abdominal imaging at 5.0 tesla: image quality evaluation compared with 3.0 tesla[J]. Insights Imaging, 2023, 14(1): 171.

[14] Shi Z, Zhao X, Zhu S, et al. Time-of-flight intracranial MRA at 3T versus 5T versus 7T: visualization of distal small cerebral arteries[J]. Radiology, 2023, 306(1): 207-217.

[15] Liu S, Ni M, Wang D, et al. Clinical diagnostic value of 5T MRI for knee injuries: a comparison study with 1.5 or 3T[J]. J Magn Reson Imaging, 2025: 70045.

[16] Welsch G H, Juras V, Szomolanyi P, et al. Magnetic resonance imaging of the knee at 3 and 7 tesla: a comparison using dedicated multi-channel coils and optimised 2D and 3D protocols[J]. Eur Radiol, 2012, 22(9): 1852-1859.

[17] Götestrand S, Björkman A, Björkman-Burtscher I M, et al. Visualization of wrist anatomy-a comparison between 7T and 3T MRI[J]. Eur Radiol, 2022, 32(2): 1362-1370.

[18] Aringhieri G, Zampa V, Tosetti M. Musculoskeletal MRI at 7 T: do we need more or is it more than enough?[J]. Eur Radiol Exp, 2020, 4: 48.

[19] de Buck M H S, Jezzard P, Hess A T. Optimization of undersampling parameters for 3D intracranial compressed sensing MR angiography at 7 T[J]. Magn Reson Med, 2022, 88(2): 880-889.

[20] Kundel H L, Polansky M. Measurement of observer agreement[J]. Radiology, 2003, 228(2): 303-308.

[21] Prener M, Opheim G, Simonsen H J, et al. Delineation of grade Ⅱ and Ⅲ gliomas investigated by 7T MRI: an inter-observer pilot study[J]. Diagnostics(Basel), 2023, 13(8): 1365.