

Diagnostic Efficacy of Pseudo-CT Images based on MRI for Structural Lesions of Sacroiliitis

论著

基于MRI的伪CT图像对骶髂关节炎结构性病变的诊断效能

董晚亭* 潘小文 罗容智

罗飞

四川省骨科医院放射科(四川成都 610000)

【摘要】目的 分析基于MRI的伪CT图像对骶髂关节炎结构性病变的诊断效能。**方法** 选择2020年7月至2021年6月于本院放射科检查的疑似骶髂关节炎患者53例，分别采用CT、T₁加权MRI及伪CT对结构性病变进行诊断，并以CT结果为参考标准，比较MRI及伪CT对结构性病变的诊断效能。**结果** 除MRI诊断侵蚀的观察者间一致性强度为中等水平外($K=0.593$)，CT、伪CT及MRI诊断结构性病变的观察者内一致性、观察者间一致性绝大部分处于较强水平($k=0.627\sim0.898$)；采用广义估计方程调整参与者内部相关效应后，伪CT诊断侵蚀的准确性及特异性明显高于MRI，诊断硬化、强直的准确性及敏感性明显高于MRI，差异有统计学意义($P<0.05$)；伪CT诊断侵蚀、强直的置信度明显优于MRI($P<0.05$)；伪CT诊断结构性病变与CT比较差异无统计学意义($P>0.05$)。**结论** 在疑似骶髂关节炎结构性病变诊断中，采用基于MRI的伪CT图像比T₁加权MRI的诊断效能更高，置信度可与CT媲美。

【关键词】MRI；伪CT；骶髂关节；结构性病变；放射学诊断

【中图分类号】R445.2；R445.3

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2022.05.057

DONG Wan-ting*, PAN Xiao-wen, LUO Rong-zhi, LUO Fei.

Department of Radiology, Sichuan Orthopedic Hospital, Chengdu 610000, Sichuan Province, China

ABSTRACT

Objective To analyze the diagnostic efficacy of pseudo-CT images based on MRI for structural lesions of sacroiliitis. **Methods** 53 patients with suspected sacroiliitis who were examined in the radiology department of our hospital from July 2020 to June 2021 were selected. CT, T₁-weighted MRI and pseudo-CT were used to diagnose structural lesions, and the CT results were used as references. Standard to compare the diagnostic efficacy of MRI and pseudo-CT for structural lesions. **Results** In addition to the moderate intensity of inter-observer consistency in MRI diagnosis of erosions ($k=0.593$), the intra-observer and inter-observer consistency of CT, pseudo-CT and MRI in the diagnosis of structural lesions were mostly at a strong level ($K=0.627\sim0.898$). After using the generalized estimation equation to adjust the internal correlation effects of participants, the accuracy and specificity of pseudo-CT in diagnosing erosion were significantly higher than that of MRI, and the accuracy and sensitivity of diagnosing sclerosis and rigidity were significantly higher than that of MRI, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). The confidence of pseudo-CT in the diagnosis of erosion and rigidity is significantly better than that of MRI ($P<0.05$). There is no difference between pseudo-CT in the diagnosis of structural lesions and CT Statistically significant ($P>0.05$). **Conclusion** In the diagnosis of structural lesions of suspected sacroiliitis, MRI-based pseudo-CT images have higher diagnostic efficiency than T₁-weighted MRI, and the confidence level is comparable to CT.

Keywords: MRI; Pseudo-CT; Sacroiliac Joint; Structural Lesions; Radiological Diagnosis

目前，MRI在脊柱关节炎中已获得广泛应用，骶髂关节MRI病变是用于诊断脊柱关节炎的放射学标准，对提高脊柱关节炎的诊断准确性具有重要价值^[1]。骶髂关节骨髓水肿在诊断中具有关键作用，但其敏感度(76%)及特异性(74%)不足^[2]；同时，骶髂关节侵蚀在患有脊柱关节炎的情况下不太普遍，而且常规T₁加权MRI扫描很难发现侵蚀等结构性病变，敏感性较低(54%)^[3]。CT比传统X线检测骶髂关节结构异常的敏感度更高，而且检测骨质异常(如关节面骨侵蚀、毛糙等)的特异性也比MRI高，但其对水肿的检测有限^[4-5]。MRI与CT联合使用可提高敏感度和特异性，但同时进行CT和MRI检查会增加患者经济负担及放射性电离辐射，医生还会面临更复杂的工作流程。基于MRI的伪CT是一种基于深度学习的技术，其通过执行三维MRI到CT映射并从轴向三维T₁加权多梯度回波序列获得类似CT图像^[6]，在骶髂关节结构性病变中可能具有潜在应用价值。因此，本研究分析了基于MRI的伪CT图像对疑似骶髂关节炎患者结构性病变的诊断效能，以为今后工作提供思路。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性选择2020年1月至2020年12月于本院放射科行MRI及CT检查的疑似骶髂关节炎患者53例。纳入标准：年龄≥18岁；经专科门诊医生诊断为疑似骶髂关节炎；无腰背外伤史及手术史；无恶性肿瘤；MRI及CT检查均在同一天。排除标准：MRI及CT图像不齐全；体内有金属植入物者；妊娠期患者；精神病患者；3个月内使用过对骨代谢造成影响的药物。入选患者中，男27例，女26例；年龄21~59岁，平均年龄(43.72±11.60)岁；腰痛持续时间1~18年，平均年龄(9.57±3.45)年；体脂指数18.50~28.14 kg/m²，平均体脂指数(25.05±6.49)kg/m²。本研究已获得院伦理委员会批准，患者均签署知情同意书。

1.2 方法

【第一作者】董晚亭，女，医师，主要研究方向：骨肌系统影像诊断。E-mail: d8787548@163.com

【通讯作者】董晚亭

1.2.1 MRI检查 采用美国通用电气(GE)公司的1.5T超导MRI进行检查,患者取仰卧位,平行于骶骨长轴扫描,同时对可疑病变更进行增强扫描;扫描序列: T_1 加权成像序列、快速自旋回波序列以及反转恢复序列。此外,进行三维 T_1 多梯度回波序列扫描以供重建伪CT图像,重复时间/回波时间为3ms/7ms,视野400mm×400mm,矩阵384×384,采集时间为5min37s。

1.2.2 伪CT图像生成 选择中创新影软件重建伪CT图像。该软件借助U-net体系架构的深度学习法,通过成对MRI和CT数据学习,利用三维 T_1 多梯度回波序列扫描图像中的局部空间上下文信息来重建缺失骨结构。软件运行后,通过医学数字成像和通信网络连接影像存档及通信系统(PACS),PACS将源MRI扫描图像自动转发至软件,生成伪CT图像30min内自动返回PACS^[7]。

1.2.3 CT检查 MRI检查后同一天,采用德国西门子64排螺旋CT对全骶髂关节进行平扫(患者取仰卧位),准直32×0.6mm,间距0.6,层厚5mm,视野625mm×500mm,旋转时间0.5s,瞬时高低电压切换,最低管电压100kVp,最高管电压140kVp;为进一步分析,以0.5:0.5的默认比率计算加权平均图像,以类似于120kV图像。

1.2.4 图像分析 伪CT图像及CT图像均在冠状位重建(切片厚度和增量均为1mm),由对本研究事先不知情的2名放射科医生采用RadiAnt DICOM Viewer软件,分别在3个不同时间段依据CT、伪CT及 T_1 加权MRI图像独立评估骶髂关节中是否存在结构性病变(一种成像方法获得的图像分析完成后,间隔2周再打乱顺序分析下一种),每侧骶髂关节均分成四个象限用于侵蚀和硬化评分,分成上、下两半用于强直评分。结构性病变定义如下:侵蚀。CT或伪CT发现关节表面软骨下骨皮质明显中断; T_1 加权MRI发现关节边缘骨缺损,软骨下皮层暗信号全层丢失(见图1~3大箭头)。硬化。CT或伪CT发现高衰减值从关节间隙延伸至少5mm; T_1 加权MRI发现软骨下低信号强度带(见图1~3小箭头)。强直。CT或伪CT或MRI发现跨关节骨桥,关节两侧软骨下骨板全层缺失^[8-9]。两名放射科医生对CT评估结果共同进行探讨形成共识并作为参考标准。每个病灶的诊断置信度采用4分制评分,其中1分为置信度差,几乎无法诊断;2分为低置信度,可能影响诊断;3分为中等置信度,不影响诊断;4分为高置信度,有助于明确诊断^[10]。上述分析全部完成后间隔2周,随机抽取20名的患者CT、伪CT及 T_1 加权MRI图

像,由其中1名放射科医生进行再次分析,以用于评估观察者内的一致性。

1.3 统计学方法 采用SPSS 26.0软件处理数据,Cohen's kappa系数分析不同成像方法观察者内和观察者间的一致性。因来自同一参与者的病灶可靠性评分并非独立数据,为了结合2名观察者评分分析不同成像方式的诊断性能,本研究拟合了具有logit连接函数的二项式分布广义估计方程,并选择等相关结构作为作业相关矩阵对同一患者各测量值之间的相关性进行校正(跨象限、观察者及方法),模型的固定效应部分包含所使用的成像方法,并进行边际概率估计及成对比较(其中,伪CT与MRI的比较用于分析诊断性能;伪CT与MRI及伪CT与CT比较用于分析置信度)。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结 果

2.1 疑似骶髂关节炎患者临床诊断情况 53例患者中,有39例(占比73.58%)最终临床诊断为中轴型脊柱关节炎,14例(占比26.42%)为其他关节病、变性或解剖变异;MRI和CT检查间隔时间1~3h,平均间隔时间(1.65±0.53)h。CT诊断情况:有75个象限为侵蚀,占比17.69%(75/424);有102个象限为硬化,占比24.06%(102/424);有42个部分为强直,占比19.81%(42/212)。

2.2 不同成像方法观察者内和观察者间的一致性 除MRI诊断侵蚀的观察者间一致性强度为中等外($k=0.593$),CT、伪CT及MRI诊断结构性病变的观察者内一致性、观察者间一致性绝大部分处于较强水平($k=0.627\sim0.898$),见表1。

2.3 不同成像方法对结构性病变的诊断效能 每名观察者对结构性病变诊断效能见表2(未采用模型调整)。对不同观察者、象限及方法的参与者内部相关效应进行调整后发现:伪CT诊断侵蚀的准确性及特异性明显高于MRI,诊断硬化、强直的准确性及敏感性明显高于MRI,差异有统计学意义($P<0.05$),见表3。

表1 不同成像方法观察者内和观察者间的一致性

成像方法	观察者内(k)			观察者间(k)		
	侵蚀	硬化	强直	侵蚀	硬化	强直
CT	0.768	0.865	0.843	0.861	0.746	0.783
伪CT	0.704	0.877	0.862	0.735	0.898	0.784
MRI	0.753	0.685	0.709	0.593	0.740	0.627

表2 不同观察者对结构性病变的诊断效能(未采用模型调整)[%(n)]

项目	观察者1		观察者2		
	伪CT	MRI	伪CT	MRI	
侵蚀	准确性	93.40(396/424)	84.91(360/424)	92.22(391/424)	86.08(365/424)
	敏感性	84.00(63/75)	64.00(48/75)	80.00(60/75)	82.67(62/75)
	特异性	95.42(333/349)	89.40(312/349)	94.84(331/349)	86.82(303/349)
硬化	准确性	97.17(412/424)	83.02(352/424)	96.46(409/424)	80.19(340/424)
	敏感性	94.12(96/102)	34.31(35/102)	92.16(94/102)	25.49(26/102)
	特异性	98.14(316/322)	98.45(317/322)	97.83(315/322)	97.52(314/322)
强直	准确性	89.62(190/212)	86.32(183/212)	92.92(197/212)	84.43(179/212)
	敏感性	97.62(41/42)	76.19(32/42)	92.86(39/42)	66.67(28/42)
	特异性	87.65(149/170)	88.82(151/170)	92.94(158/170)	88.82(151/170)

2.4 不同成像方法诊断结构性病变的置信度 伪CT诊断侵蚀、强直的置信度明显优于MRI(均P<0.05)；伪CT诊断结构性病变与CT比较差异无统计学意义(均P>0.05)，见表4。

表3 广义估计模型中不同成像方法对结构性病变的诊断效能[% (95%CI)]

项目	伪CT	MRI	McNemar's	χ^2	P
侵蚀	准确性	93.87(87.19~96.95)	86.79(78.26~91.08)	18.283	<0.001
	敏感性	78.67(60.29~89.13)	69.33(58.41~84.05)	3.273	0.065
	特异性	97.13(91.93~98.58)	90.54(87.42~94.08)	17.926	<0.001
硬化	准确性	98.11(96.05~99.21)	81.84(73.28~89.53)	54.400	<0.001
	敏感性	93.14(84.62~96.95)	29.41(14.07~36.28)	61.134	<0.001
	特异性	99.69(90.36~99.92)	98.45(93.17~99.99)	1.500	0.219
强直	准确性	90.09(80.82~95.49)	84.91(73.06~93.51)	5.263	0.019
	敏感性	95.24(78.69~97.25)	69.05(50.06~83.19)	7.692	0.003
	特异性	88.82(80.15~94.79)	88.82(79.40~95.14)	0.000	1.000

表4 广义估计模型中不同成像方法诊断结构性病变的置信度[% (95%CI)]

病变	置信度	伪CT	MRI	CT
侵蚀	高	88.91(84.97~93.84)	79.95(70.83~84.96) ^a	87.97(80.19~93.06)
	中	5.19(3.10~7.21)	7.08(5.46~9.10) ^a	7.08(4.39~8.68)
	低	3.07(1.73~4.26)	11.08(7.83~14.09) ^a	4.48(2.47~6.39)
	差	2.83(1.38~4.02)	1.89(1.00~3.05) ^a	0.47(0.12~1.64)
硬化	高	97.17(95.02~98.63)	99.76(97.19~99.93)	99.29(95.93~99.99)
	中	2.59(1.03~3.74)	0.24(0.09~0.75)	0.47(0.12~0.89)
	低	0.24(0.07~0.92)	0.00(0.00~0.00)	0.24(0.04~0.83)
	差	0(0.00~0.00)	0.00(0.00~0.00)	0.00(0.00~0.00)
强直	高	91.98(87.68~95.12)	76.89(72.19~80.02) ^a	92.92(89.16~94.01)
	中	4.72(2.38~5.92)	3.30(1.38~5.02) ^a	2.83(1.29~4.33)
	低	2.36(1.90~4.02)	15.09(12.37~18.23) ^a	2.83(1.02~4.55)
	差	0.94(0.31~1.86)	4.72(1.59~5.74) ^a	1.42(0.85~3.91)

注：^a表示与合成CT比较，差异具有统计学意义(P<0.05)。

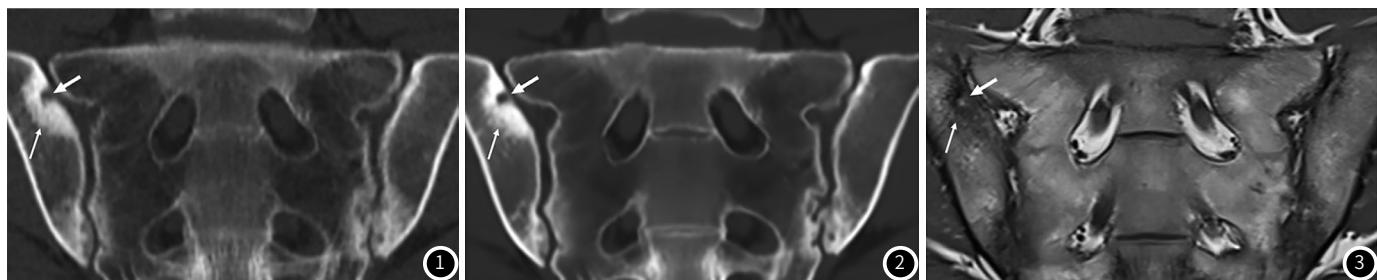


图1 CT中骶髂关节侵蚀及硬化图像(男，30岁，骶髂关节炎)大箭头：侵蚀，小箭头：硬化。图2 伪CT中骶髂关节侵蚀及硬化图像(男，30岁，骶髂关节炎)大箭头：侵蚀，小箭头：硬化。图3 MRI中骶髂关节侵蚀及硬化图像(男，30岁，骶髂关节炎)大箭头：侵蚀，小箭头：硬化。

补MRI在骶髂关节结构性病变诊断中的局限性^[12]。

基于深度学习的伪CT图像合成技术可基于衰减图以定量方式将骨结构可视化，而且图像质量比原始图像更高，有助于显示皮质及皮质下骨骼，而且图像后处理全程由后台自动实现，用户只需阅读合成的伪CT图像结果即可，无需另外介入。目前国内基于深度学习的MRI伪CT图像合成技术仅在肿瘤放射治疗中应用较多^[13]，而在骨关节疾病诊断中的应用较少。国外Staartjes等^[14]研究发现，基于MRI合成的伪CT在腰椎病变检查中具有极高的一致性。本研究采用MRI三维T₁多梯

3 讨 论

国际脊柱关节炎专家评估协会在脊柱关节炎骶髂关节MRI病变相关内容中提出，MRI有助于评估疾病活动性，其对脊柱关节炎的早期诊断具有重要价值，而且在常规影像学检查中也是唯一可以清晰显示骨髓炎症水肿的^[18]。但常用的T₁加权MRI扫描对侵蚀、强直等的诊断置信度及特异性不高，可能会影响医生最终诊断^[11]。CT虽然能良好弥补上述缺陷，但无形中增大了患者身体辐射负担及医疗成本。伪CT图像可能有助于弥

度回波序列图像，通过深度学习后合成了伪CT图像，结果也发现其对骶髂关节侵蚀、硬化及强直诊断的观察者内和观察者间一致性均较好($k=0.704\sim0.898$)，而且一致性强度大多与CT和MRI相同，为该技术在骶髂关节结构性病变诊断的临床应用提供了基础。

Breighner等^[15]研究发现，采用MRI零回波时间序列生成的CT样图像，与脊柱和臀部CT具有较好的一致性，但该技术对皮质骨的特异性缺乏，而且需要特定的硬件设备。菅影超等^[16]通过3D深度卷积神经网络模型，依据MRI生成了伪CT，发现明显提高了骨骼、空气与软组织之间成像精度。本研究采用的深度学习技术，通过3D U-net架构利用训练好的网络模型对骶髂关节三维MRI图像进行自动分割处理，网络编码器按照不同模态分别提取特征再进行总体融合，从而合成高成像质量及高准确度的伪CT图像^[17]。将两名放射科医生通过CT共同确认的骶髂关节结构性病变作为参考标准，比较了伪CT和T₁加权MRI的诊断效能，结果发现：伪CT诊断侵蚀的准确性及特异性明显高于MRI，诊断硬化、强直的准确性及敏感性明显高于MRI；伪CT诊断侵蚀、强直的置信度明显优于MRI，与Jans等^[18]报道基本一致。提示伪CT比MRI能够更加可靠的描绘骶髂关节结构性病变，在不影响敏感性的情况下诊断侵蚀特异性的提高，有助于改善既往常规MRI特异性较低的问题；而对于硬化和强直，则在不失去特异性的情况下提高了敏感性(因硬化和强直为炎症后骨骼修复的迹象^[8])，这可能有助于指导患者治疗及随访。

本研究存在的局限性：纳入样本量偏少，样本均来自省级三甲医院，可能存在选择偏差，今后需加大样本量进行多中心研究；另外，伪CT对病变检测的原始序列附加价值尚未分析，是下一步研究的目标。

综上，本研究发现基于MRI合成的伪CT描绘骶髂关节结构性病变的诊断效能高于常规T₁加权MRI，可靠性可与CT媲美。

参考文献

- [1] 谢雅, 杨克虎, 吕青, 等. 强直性脊柱炎/脊柱关节炎患者实践指南[J]. 中华内科杂志, 2020, 59 (7): 511-518.
- [2] 王炎焱, 黄烽. 脊柱关节炎早期诊断的机遇与挑战: 磁共振成像判断骶髂关节炎的利与弊[J]. 中华内科杂志, 2021, 60 (3): 187-191.
- [3] Jans L, Egund N, Eshed I, et al. Sacroiliitis in axial spondyloarthritis: Assessing morphology and activity[J]. Semin Musculoskelet Radiol, 2018, 22 (2): 180-188.
- [4] 戴生明. 熟悉骶髂关节的解剖特点与变异避免脊柱关节炎的误诊[J]. 中华风湿病学杂志, 2020, 24 (9): 577-579.
- [5] 李风莲. MRI诊断早期强直性脊柱炎骶髂关节病变分级的临床价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2019, 17 (5): 137-140.
- [6] 菅影超, 付东山, 王伟. 基于MRI的合成CT生成方法综述[J]. 中国生物医学工程学报, 2020, 39 (4): 485-492.
- [7] Florkow MC, Zijlstra F, Willemse K, et al. Deep learning-based MR-to-CT synthesis: The influence of varying gradient echo-based MR images as input channels[J]. Magn Reson Med, 2020, 83 (4): 1429-1441.
- [8] Maksymowich W P, Lambert RG, Østergaard M, et al. MRI lesions in the sacroiliac joints of patients with spondyloarthritis: an update of definitions and validation by the ASAS MRI working group[J]. Ann Rheum Dis, 2019, 78 (11): 1550-1558.
- [9] Diekhoff T, Hermann K G, Greese J, et al. Comparison of MRI with radiography for detecting structural lesions of the sacroiliac joint using CT as standard of reference: results from the SIMACT study[J]. Ann Rheum Dis, 2017, 76 (9): 1502-1508.
- [10] Notohamiprodjo S, Stahl R, Braunagel M, et al. Diagnostic accuracy of contemporary multidetector computed tomography (MDCT) for the detection of lumbar disc herniation[J]. Eur Radiol, 2017, 27 (8): 3443-3451.
- [11] 王健雄, 徐胜前. 中轴型脊柱关节炎的诊疗进展[J]. 临床内科杂志, 2021, 38 (5): 289-292.
- [12] 曲岷. MSCT、MRI及X线诊断强直性脊柱炎骶髂关节病变价值比较[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19 (4): 150-153.
- [13] 孙鸿飞, 倪昕晔, 杨建华, 等. 基于深度学习方法的伪CT图像合成技术研究及在放疗中的应用进展[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, 41 (3): 222-228.
- [14] Staartjes V E, Seevinck P R, Vandertop W P, et al. Magnetic resonance imaging-based synthetic computed tomography of the lumbar spine for surgical planning: A clinical proof-of-concept[J]. Neurosurg Focus, 2021, 50 (1): E13.
- [15] Breighner RE, Bogner EA, Lee SC, et al. Evaluation of osseous morphology of the hip using zero echo time magnetic resonance imaging[J]. Am J Sports Med, 2019, 47 (14): 3460-3468.
- [16] 菅影超, 付东山, 王伟. 基于3D深度卷积神经网络依据MRI生成伪CT的研究[J]. 天津医科大学学报, 2020, 26 (2): 133-137.
- [17] 殷晓航, 王永才, 李德英. 基于U-Net结构改进的医学影像分割技术综述[J]. 软件学报, 2021, 32 (2): 519-550.
- [18] Jans LB0, Chen M, Elewaut D, et al. MRI-based synthetic CT in the detection of structural lesions in patients with suspected sacroiliitis: Comparison with MRI[J]. Radiology, 2021, 298 (2): 343-349.

(收稿日期: 2021-08-25)