

影像学在子宫肌瘤HIFU治疗中的应用进展

申丽*, 黄晓, 刘羽遥, 李庆雪, 杨全#

重庆医科大学附属永川医院放射科, 重庆

收稿日期: 2024年3月15日; 录用日期: 2024年4月9日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

高强度聚焦超声(HIFU)是一种无侵入性治疗技术, 影像学在术前评估肌瘤特征、术中监测、术后疗效及周围组织损伤评估方面具有重要应用价值, 本文就CT、超声、磁共振及影像组学在HIFU治疗子宫肌瘤中的应用进行综述。

关键词

子宫肌瘤, HIFU, 影像组学, 磁共振成像, 综述

The Advancements of Imaging in the HIFU Treatment of Uterine Fibroids

Li Shen*, Xiao Huang, Yuyao Liu, Qingxue Li, Quan Yang#

Department of Radiology, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Mar. 15th, 2024; accepted: Apr. 9th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

High-intensity focused ultrasound (HIFU) is a non-invasive therapeutic technique. Imaging plays a crucial role in preoperative assessment of fibroid characteristics, intraoperative monitoring, post-operative efficacy evaluation, and assessment of surrounding tissue damage. This article provides a comprehensive review of the applications of CT, ultrasound, magnetic resonance imaging, and radiomics in HIFU treatment of uterine fibroids.

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 申丽, 黄晓, 刘羽遥, 李庆雪, 杨全. 影像学在子宫肌瘤 HIFU 治疗中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(4): 915-922. DOI: 10.12677/acm.2024.1441106

Keywords

Uterine Fibroids, High-Intensity Focused Ultrasound (HIFU), Radiomics, Magnetic Resonance Imaging, Review

Copyright © 2024 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

子宫肌瘤(Uterine fibroid)发病率高达 70%，是育龄期妇女最常见的生殖系统良性肿瘤[1]，大多数肌瘤患者因为子宫异常出血、疼痛、复发性流产甚至不育等临床症状而严重影响其生活质量[2]。目前肌瘤治疗方法包括保守的长期药物治疗、有创的外科手术及腹腔镜肌瘤摘除术、微创或无创的子宫动脉栓塞术及高强度聚焦超声(high-intensity focused ultrasound, HIFU)消融术等。药物治疗治标不治本且长期使用具有较大的耐药性及副作用，外科手术具有较多禁忌症且对患者心理及生理均造成严重影响，腹腔镜肌瘤摘除术易导致肌瘤复发。最新研究表明腹腔镜肌瘤摘除术后，约有 36%的患者在 1~2 年内出现肌瘤复发[3]，子宫动脉栓塞术有极高的栓塞后综合征风险，约有 60%的患者在接受子宫动脉栓塞术后出现栓塞后综合征[4]。而 HIFU 是一种无创介入放射技术，其安全性和有效性均高，在子宫肌瘤的临床治疗中已被普遍接受。其工作原理是利用高强度聚焦的超声波能量，通过热效应和空化效应来凝固、坏死和清除靶组织。

2. HIFU 治疗子宫肌瘤的影像学应用

并非所有的患者都适合 HIFU 治疗，如何准确预测和及时评估 HIFU 消融效果是临床医生关心的重要问题，加上 HIFU 消融过程中，易受多因素影响如病变性质和位置及声通道组织不均匀性而导致非靶组织损伤。影像学方法作为一种无创式成像方法可用来预测和评估消融率，并监测周围组织损伤和疾病治疗的进展，这些影像学方法有助于为患者提供更安全、有效的治疗选择。目前常用的影像学方法有 CT 灌注、经阴道超声、多普勒超声、超声造影、MRI、影像组学。

2.1. 计算机断层扫描(CT)

2.1.1. CT 平扫加动态增强扫描

CT 检查能够通过横断面扫描连接多个层面，有助于使完整器官的影像学信息获得清晰显现，从而从多个角度了解病灶与器官组织之间的关系。曲宏宇等选取 86 例疑似妇科盆腔肿瘤患者作为研究对象，为所有患者实施 CT 检查及病理检查，最后得出 CT 盆腔疾病诊断符合率为 75.58% [5]。但由于子宫肌瘤与正常子宫组织的密度相似，使得瘤体边界难以清晰识别，而且由于腹腔内结构复杂，CT 平扫图像容易出现组织叠加和混淆，从而降低了其诊断能力。有研究表明[6] CT 增强扫描利用对比剂进行造影，以准确观察小病灶和深部病变，其诊断准确率明显高于传统 CT 平扫。黄迪生[7]等发现在常规 CT 扫描中，超声消融后的病变区域呈现为清晰的低密度图像，而在增强 CT 扫描中则没有明显的增强。这意味着 CT 增强扫描也具有准确反映子宫肌瘤超声消融术后的形态变化的能力，并能够对消融病变的坏死程度和治疗效果进行评估。

2.1.2. CT 血管造影和 CT 灌注成像

CT 血管造影(CT Angiography, CTA)目前是一种无创性血管影像新型技术，其通过计算机后处理软件

将 CT 薄层图像重建为不同切面的三维立体血管影像。李智刚等[8]研究结果表明 CTA 在肌瘤类型区分、病变特点分析以及整体诊断中具有较高的准确性，为肌瘤的诊断和治疗提供了重要的影像学信息。另一评估血管灌注的技术为计算机断层扫描灌注成像(CTP)，其通过测量靶区注射造影剂后不同时间的 CT 值，绘制时间-密度(TDC)并计算灌注参数，来定量评估异常组织的灌注情况。Cao 等[9]发现 CTP 能够量化肝肿瘤的血管生成和血管丰富度。CTP 有望通过比较肌瘤 HIFU 术前术后灌注影像，并分析肌瘤血供情况，来评估是否存在残余肌瘤组织，从而评估疗效及指导临床决策。然而，需要更多的研究来验证其在这一领域的实际应用和有效性。

2.1.3. 双能 CT 成像

在传统 CT 扫描中，X 射线的吸收差异主要由材料的原子序数决定。而双能量 CT 的原理是利用不同材料在 X 射线能量依赖的吸收行为上的差异进行成像。双能 CT 的碘选择成像和低 keV 虚拟单能成像提高了对腹部病变微小病变的可见性，从而发现常规 CT 成像中难以察觉或无法察觉的病理情况，而且模拟的低 keV 虚拟单能(VME)图像强调碘的 X 射线吸收，可用于更好地可视化基于碘增强的组织之间的图像对比度，从而可降低辐射[10]。在腹部影像学检查中，双能量 CT 还可以减少金属假体相关的伪影，揭示更多解剖学和病理学细节[11]。总之，双能量 CT 在提供更准确的组织表征信息、降低辐射暴露、减少伪影以及增强疾病诊断方面具有重要的优势。目前在肝胆系统[12]、胆囊[13]、胰腺[14]、胃肠道[15]等病变检测及急腹症判断方面，双能 CT 已被最广泛地研究和应用。双能量 CT 有望通过分析 X 射线能谱和组织有效原子序数，来提供 HIFU 术后残留肌瘤组织信息，从而评估及预测 HIFU 消融率。未来需要更多的研究来验证其在子宫肌瘤方面的实际应用和有效性。

CT 成像不容易受到患者肠道气体影响，还可提供较广泛的检查范围，同时可以通过后处理软件进行三维重建和血管成像，有助于三维立体地评估肌瘤性质特征。但由于 CT 具有放射性、费用较高、造影剂过敏风险、软组织分辨率低，加上其他技术如双能 CT 设备昂贵，处理图像耗时耗力等限制，其在子宫肌瘤 HIFU 治疗方面的应用相对较少。

2.2. 超声成像

2.2.1. 超声造影(CEUS)

超声造影是一种通过引入造影剂来增强超声图像的对比度的技术，能够多切面地实时观察病变组织的血流灌注情况。该技术原理是通过静脉注射微泡状造影剂，其内部包含气体，外部由生物相容材料构成，如脂质或蛋白质。使其进入血液循环而不会扩散到周围组织，再利用微小气泡(UCAs)的声阻抗差异、振荡效应以及血管限制等特点来增强超声图像，从而实时动态并清楚地观察组织灌注情况[16]。目前已有文献[17] [18]证实了该技术可用于评估子宫肌瘤 HIFU 术前术后组织血供情况等方面。有研究[19]表明增强超声(CEUS)中未增强部分表示非灌注体积(NPV)，而残留肿瘤则在消融区域内显示为局部增强，且这些结果得到了进一步的病理学证实，增强超声可用于评估 HIFU 术后早期疗效。Wang [20]等使用对比增强超声(CEUS)来定量评估子宫肌瘤的灌注特征，其研究结果表明，消融度大于或等于 70% 的患者在 CEUS 图像中显示出更长的到达时间、峰值时间和增强时间，以及较低的平均增强强度和增强率。并且 CEUS 还能尽早检测到消融后的残留组织，减少额外治疗。此外，邵巧英[21]等结果表明 HIFU 消融术治疗过程中富集的微泡能够发挥增效作用，同时也可能提高治疗靶区域内皮肤及相关组织的损伤风险。Orsi [22]等也对比了术中使用超声引导的高强度聚焦超声消融(HIFUA)和术中未利用对比增强超声(CEUS)的对照组，发现术中使用 CEUS 的患者子宫肌瘤体积更快地缩小，使用能量更少。

综上所述超声造影简便易行、非侵入性、高度安全性、无放射性，可实时显示肌瘤坏死范围和残存情况，有助评估疗效、指导治疗及长期随访。但是超声造影灌注方式缺乏统一标准，加上造影结果易受

到造影剂剂量等多种因素的干扰,这可能会影响图像的质量和可靠性[23]。超声造影在评估肌瘤边界和大小、观察肌瘤内部微循环灌注方面存在局限性,此外,超声造影空间分辨率较低,当观察多发肌瘤时,前方肌瘤可能会衰减或遮挡后方肌瘤的影像,从而影响疗效的观察[24]。

2.2.2. 多普勒超声

多普勒超声可以通过彩色多普勒血流成像(CDFI)、彩色多普勒能量图(CDE)、三维能量多普勒超声(3D-PDUS)以及血流动力学指标等,来评估子宫肌瘤周边及内部血管分布、粗细以及血流动力学等情况,为 HIFU 治疗提供个性化方案。与超声造影相比,彩色多普勒超声能更准确评估肌瘤边界和大小,可更好实时地观察病灶内微小血管血流信号情况[24]。彩色多普勒超声利用回波的频率信息代替幅度信息,从而来检测和测量血流[25]。有研究发现[26]当肌瘤出现退行性变化时,平均最大峰值流速(PSV)、平均最大速度(TAMX)和平均速度(Tmean)明显较高,而舒张末速度(EDV)明显较低。陈锦云[27]发现肌瘤血液供应与术后消融率呈负相关,与消融所需 EEF 呈正相关。这项研究表明术前使用彩色多普勒超声(CDFI)来准确评估子宫肌瘤的血供状态,可以预测肌瘤术后疗效,并预测超声消融治疗的剂量,为患者制定个性化治疗计划,从而确保治疗的安全和效果。经阴道超声通过近距离观察盆腔器官,不受外部因素如腹壁脂肪、肠道及膀胱充盈度等的影响,且利用高频探头获得清晰图像,适用于检测小肌瘤或子宫后位的肌瘤。如何文凤[28]等利用经阴道彩超血流显像评估子宫肌瘤的血流情况,并进一步探讨这些血流参数与疾病的严重程度之间的关系,取得了良好结果。而能量多普勒信号对血流检测的灵敏度比常规彩色多普勒高 3~5 倍,且对超声探头与血流流向之间的角度的依赖性较小,故将经阴道超声和能量多普勒超声联合使用能提高血流灌注情况检测的准确性。然而由于血管形成的主客观量化都取决于所用机器的设置和类型,加上能量多普勒信号受到肌瘤特征以及超声机设置的影响,在子宫肌瘤的经阴道评估中使用功率多普勒超声具有挑战性。有研究[29]提供了有关经阴道超声评估子宫肌瘤中的 2D 和 3D 能量多普勒的超声机设置的概述,并提供逐步教程,以确保正确的设置和标准化,以获得可重复的研究数据。陈荣[30]等用经阴道能量多普勒彩色超声(PDI)来测量 15 名患者 HIFU 术前、术后 1、3、6 个月肌瘤内的彩色面积像素值与总面积像素值的比例(BCR),并进行分级判定,结果表明 PDI 可通过反映患者 HIFU 术后子宫肌瘤的血供情况来评估 HIFU 治疗近期疗效和指导再次治疗。

超声因简易快捷、价廉、无创、无需特殊准备等优点被广泛利用,可用于 HIFU 术前观察肌瘤大小、边界及回声特征, HIFU 术中预测消融时机、预算肌瘤投放剂量和辐照时间及观察消融情况, HIFU 术后短期及长期随访过程中观察肌瘤体积大小变化等方面。但是超声技术也存在很多不足,比如超声图像质量受腹部气体、医师经验和技巧水平、超声设备、靶组织与腹壁距离等多种因素干扰。但是由于设备价格相对廉价,可用于广大基层医院,故可根据临床需求进行选择。

2.3. 磁共振成像(MRI)

2.3.1. MRI 平扫加增强

磁共振成像原理是通过利用原子核在磁场中的特定共振频率,吸收和释放电磁波能量来生成图像。T1WI 可提供盆腔脏器解剖结构, T2WI 可提供盆腔病灶信号特征,增强扫描可提供组织血供情况。磁共振已用于预测 HIFU 疗效方面,研究发现[31], T2WI 信号越高的子宫肌瘤,其平滑肌细胞含量越高,相对胶原纤维含量越低,其吸收 HIFU 热量并转化位热能的能力越低,从而导致 HIFU 消融率越低。有研究者[32]还通过磁共振成像来观察患者 HIFU 术后骶骨信号变化,他们认为 MRI 对于监测 HIFU 术后骶骨损伤并指导临床医生调整治疗计划以降低骶骨损伤发生率、减少患者术后骶尾部和或下肢放射痛的风险具有重要意义。此外, MRgHIFU (磁共振引导高强度聚焦超声)也可作为一种无创、无辐射且多方位、多参数成像的影像技术可用于 HIFU 术中监测组织温度和引导治疗[33]。

2.3.2. DWI

DWI (Diffusion Weighted Imaging, DWI)是一种通过特殊 MRI 序列成像的 MRI 功能成像方法,可以测量组织内水分子的弥散运动,从而提供微观结构的信息。ADC(表观弥散系数)是 DWI 中的重要参数,通过 ADC 值可间接反映组织弥散运动程度。此外 IVIM-DWI 是一种使用多个 b 值的扫描方法,通过双指数模型计算出 SlowADC 值、FastADC 值和 f 值,以区分组织的扩散和灌注信息,不需要使用对比剂,能够更全面地反映组织的特征,包括水分子扩散和微循环灌注。近年来 DWI 技术在 HIFU 治疗子宫肌瘤后评估治疗效果并监测组织的微观结构变化等方面应用越来越多。由于组织密度和血管分布的差异,并非所有肌瘤都适合 HIFU 治疗,所以术前评估肌瘤是否能进行 HIFU 治疗尤为重要。以往基于 T2WI 图像上肌瘤的信号强度与子宫肌层和肌肉信号强度的差异进行 Funaki 分类,然而此种分类是定性的,具有一定主观性,且基于 T2WI 信号分类时组间消融率的相关性相对较弱且重叠较大。研究表明 ADC 分类可能是预测 HIFU 治疗子宫肌瘤的疗效的一种可靠方法,甚至可能优于 Funaki 分类[34]。IVIM-DWI 技术可以非侵入性定量地评估子宫肌瘤微血管的扩散和灌注特性,而无需使用造影剂,可用于预测 HIFU 消融对子宫肌瘤的早期影响[35]。

2.3.3. DTI

DTI (Diffusion Tensor Imaging)是一种基于磁共振成像,特别是扩散加权成像(DWI),通过在其不同方向上测量水分子在组织中的扩散速度和方向来生成图像的磁共振成像技术,用于评估水分子在病灶组织中的扩散过程,以了解病灶组织内部微结构和功能状态。周芳露[36]等对 15 例子宫肌瘤患者进行 HIFU 术前术后 1 天内 DTI 扫描,来评估 DTI 参数与 HIFU 消融率的相关性。结果表明 DTI 参数,尤其是 FA 值,可以用来预测子宫肌瘤的 HIFU 消融疗效,有助于临床医生制定个性化治疗方案,提高治疗效果。张新[37]等发现 DTI 可以显示 HIFU 术后肌瘤周围组织的微观结构,从而评估安全性及指导临床控制辐照剂量和辐照时间。

MRI 是一种无创无辐射的多参数检查方法,可提供子宫肌瘤的大小、边界、数量、类型和位置等信息,MRI 成为一种有力的工具,近年来在肌瘤 HIFU 预测 HIFU 疗效、监测安全性、随访等方面被广泛应用。然而,MRI 预约较麻烦,检查时间较长,并且要求患者的配合度高,禁忌症较多。

2.4. 影像组学

2.4.1. 基于超声影像组学

超声影像组学在其他疾病领域已经取得了显著的成就,但在 HIFU 治疗子宫肌瘤方面,其分辨率较低,提供的信息也较有限,所以基于二维普通超声图像的超声影像组学研究极少。近年来,随着深度学习技术的不断进步,超声影像组学的应用前景非常广阔,有望在 HIFU 治疗子宫肌瘤的疗效预测中发挥更大作用。

2.4.2. 基于 MRI 影像组学

由于其高度分辨软组织的能力及多序列成像等特点,MRI 被广泛用于影像组学方面。陈丽萍[38]等认为影像组学可以量化不同组织病理学引起的图像强度、形状或纹理的微小组织差异,从而克服了图像解释的主观性。张金伟[39]等利用基于 MRI 参数的机器学习模型来预测 HIFU 消融后子宫肌瘤的非灌注体积(NPV)减少和残余肌瘤再生。研究发现消融术后残余肌瘤体积与术后非灌注体积减少(即术后非灌注体积与后续非灌注体积之差)呈正相关,且残留的肌瘤很难消融。周彦[40]等也发现使用基于 T2WI 加权序列的影像组学模型可以很好预测高强度聚焦超声消融后 1 年内残留肌瘤再生。有效预测残留肌瘤的再生可有助于预测患者的预后,并能通过持续随访和内分泌治疗等及时进行临床干预。郑奕能[41]等认为基

于多序列的影像组学模型预测性能优于单一序列模型。

影像组学可以从影像图像上挖掘视觉无法识别的信息，且可转换为定量特征，客观准确地补充有价值的信息。但是影像组学在子宫肌瘤 HIFU 术后疗效的预测方面研究较少，未来希望更多研究来验证其预测价值，且影像组学模型建立流程未进行规范化。

3. 总结与展望

CT 对肌瘤的诊断不敏感且具有辐射，故较少被用于评估子宫肌瘤 HIFU 疗效方面。超声因深度受限、图像质量受干扰、依赖操作员经验等限制，对疗效观察不如磁共振，但是其成本较低，且简便易行，故临床常用来筛查子宫肌瘤及进行 HIFU 术前术后随访。MRI 因其高度软组织分辨率对肌瘤组织的诊断率较高，临床上常用来观察 HIFU 术后即刻消融情况，而影像组学可挖掘磁共振图像上潜在的病理学信息，故基于 MRI 图像建立影像组学预测模型将是未来发展方向。

参考文献

- [1] Datir, S.G. and Bhake, A. (2022) Management of Uterine Fibroids and Its Complications during Pregnancy: A Review of Literature. *Cureus*, **14**, e31080. <https://doi.org/10.7759/cureus.31080>
- [2] Giuliani, E., As-Sanie, S. and Marsh, E.E. (2020) Epidemiology and Management of Uterine Fibroids. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, **149**, 3-9. <https://doi.org/10.1002/ijgo.13102>
- [3] 何飞彩, 郭春梅, 吴燕平. 子宫肌瘤剔除术后复发情况调查及危险因素分析[J]. 中国妇幼保健, 2023, 38(2): 322-325.
- [4] 张璐芳, 李选, 刘朝晖. 子宫动脉栓塞治疗子宫肌瘤的疗效和并发症分析[J]. 中国妇产科临床杂志, 2003, 4(5): 342-346, 365.
- [5] 曲鸿宇, 张志娟, 王佳哲. CT、MRI 在诊断妇科盆腔肿瘤中的临床分析[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(1): 237-238.
- [6] 王传堂, 高强, 张燕, 等. CT 平扫加增强扫描对子宫肌瘤放射诊断的应用效果分析[J]. 现代医用影像学, 2021, 30(7): 1285-1288.
- [7] 孟建钦. 子宫肌瘤超声消融术的弥散张量成像观测[D]: [硕士学位论文]. 新乡: 新乡医学院, 2018.
- [8] 李智刚. 多排螺旋 CT 子宫动脉 CTA 在子宫肌瘤中的应用价值[J]. 实用妇科内分泌电子杂志, 2023, 10(7): 89-91.
- [9] Cao, X. and Jiang, X. (2013) Evaluating the Effect of High-Intensity Focused Ultrasound Therapy on Liver Tumors Using Multislice CT Perfusion. *Oncology Letters*, **5**, 511-514. <https://doi.org/10.3892/ol.2012.1068>
- [10] Sodickson, A.D., Keraliya, A., Czakowski, B., Primak, A., Wortman, J. and Uyeda, J.W. (2021) Dual Energy CT in Clinical Routine: How It Works and How It Adds Value. *Emergency Radiology*, **28**, 103-117. <https://doi.org/10.1007/s10140-020-01785-2>
- [11] Hamid, S., Nasir, M.U., So, A., Andrews, G., Nicolaou, S. and Qamar, S.R. (2021) Clinical Applications of Dual-Energy CT. *Korean Journal of Radiology*, **22**, 970-982. <https://doi.org/10.3348/kjr.2020.0996>
- [12] Itani, M., Bresnahan, B.W., Rice, K., Gunn, M.L., Wang, S.S., Revels, J.W. and Mileto, A. (2019) Clinical and Payer-Based Analysis of Value of Dual-Energy Computed Tomography for Workup of Incidental Abdominal Findings. *Journal of Computer Assisted Tomography*, **43**, 605-611. <https://doi.org/10.1097/RCT.0000000000000886>
- [13] Soesbe, T.C., Lewis, M.A., Xi, Y., Browning, T., Ananthakrishnan, L., Fielding, J.R., Lenkinski, R.E. and Leyendecker, J.R. (2019) A Technique to Identify Isoattenuating Gallstones with Dual-Layer Spectral CT: An *ex Vivo* Phantom Study. *Radiology*, **292**, 400-406. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019190083>
- [14] Mastrodicasa, D., Delli Pizzi, A. and Patel, B.N. (2019) Dual-Energy CT of the Pancreas. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, **40**, 509-514. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2019.05.002>
- [15] Mileto, A., Ananthakrishnan, L., Morgan, D.E., Yeh, B.M., Marin, D. and Kambadakone, A.R. (2021) Clinical Implementation of Dual-Energy CT for Gastrointestinal Imaging. *American Journal of Roentgenology*, **217**, 651-663. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.25093>
- [16] Kessner, R., Nakamoto, D.A., Kondray, V., Partovi, S., Ahmed, Y., and Azar, N. (2019) Contrast-Enhanced Ultrasound Guidance for Interventional Procedures. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **38**, 2541-2557. <https://doi.org/10.1002/jum.14955>

- [17] 李季, 回世德, 黄震. 超声造影技术在 HIFU 治疗子宫肌瘤中的应用[J]. 海南医学, 2023, 34(2): 236-239. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6350.2023.02.019>
- [18] 张梅莹, 程杰军, 万晓燕, 等. 超声造影与增强磁共振成像评估高强度聚焦超声治疗子宫肌瘤疗效的比较[J]. 实用妇产科杂志, 2022, 38(1): 37-42.
- [19] Stoelinga, B., Juffermans, L., Dooper, A., de Lange, M., Hehenkamp, W., Van den Bosch, T. and Huirne, J. (2021) Contrast-Enhanced Ultrasound Imaging of Uterine Disorders: A Systematic Review. *Ultrasonic Imaging*, **43**, 239-252. <https://doi.org/10.1177/01617346211017462>
- [20] Wang, Y.J., Zhang, P.H., Zhang, R. and An, P.L. (2019) Predictive Value of Quantitative Uterine Fibroid Perfusion Parameters from Contrast-Enhanced Ultrasound for the Therapeutic Effect of High-Intensity Focused Ultrasound Ablation. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **38**, 1511-1517. <https://doi.org/10.1002/jum.14838>
- [21] 邵巧英, 卢斌, 徐琛. 超声造影联合高强度聚焦超声消融术治疗子宫单发肌瘤的疗效观察[J]. 中国妇幼保健, 2021, 36(11): 2652-2655.
- [22] Torkzaban, M., Machado, P., Gupta, I., Hai, Y. and Forsberg, F. (2021) Contrast-Enhanced Ultrasound for Monitoring Non-surgical Treatments of Uterine Fibroids: A Systematic Review. *Ultrasound in Medicine and Biology*, **47**, 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.09.016>
- [23] 苏萍, 许永华, 王伊, 等. 增强 MRI 和超声造影评估高强度聚焦超声治疗子宫肌瘤的比较研究[J]. 介入放射学杂志, 2019, 28(2): 138-142.
- [24] 黄艺媚, 黄文静, 胡庆兰, 等. 对比增强超声造影与彩色多普勒超声在评价高强度聚焦超声治疗子宫肌瘤中的价值对比[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(12): 111-113.
- [25] Peng, S., Zhang, L., Hu, L., Chen, J., Ju, J., Wang, X., Zhang, R., Wang, Z. and Chen, W. (2015) Factors Influencing the Dosimetry for High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Uterine Fibroids: A Retrospective Study. *Medicine*, **94**, e650. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000000650>
- [26] Idowu, B.M. and Ibitoye, B.O. (2018) Doppler Sonography of Perifibroid and Intrafibroid Arteries of Uterine Leiomyomas. *Obstetrics & Gynecology Science*, **61**, 395-403. <https://doi.org/10.5468/ogs.2018.61.3.395>
- [27] 姚一静, 姜立新. 超声影像方法在预测 HIFU 治疗子宫肌瘤疗效中的应用[J]. 声学技术, 2021, 40(3): 376-380.
- [28] 何文凤, 胡玉新, 唐淑琼, 等. 基于经阴道彩超血流显像的子宫肌瘤诊断及 HIFU 疗效评价[J]. 影像科学与光化学, 2022, 40(4): 907-911.
- [29] Frijlingh, M., Juffermans, L., de Leeuw, R., de Bruyn, C., Timmerman, D., van den Bosch, T. and Huirne, J.A.F. (2022) How to Use Power Doppler Ultrasound in Transvaginal Assessment of Uterine Fibroids. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, **60**, 277-283. <https://doi.org/10.1002/uog.24879>
- [30] 陈小辉. 常规超声图像指标对聚焦超声消融治疗子宫肌瘤效果的预测价值[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆医科大学, 2022.
- [31] Huang, H., Ran, J., Xiao, Z., Ou, L., Li, X., Xu, J., Wang, Q., Wang, Z. and Li, F. (2019) Reasons for Different Therapeutic Effects of High-Intensity Focused Ultrasound Ablation on Excised Uterine Fibroids with Different Signal Intensities on T2-Weighted MRI: A Study of Histopathological Characteristics. *International Journal of Hyperthermia*, **36**, 477-484. <https://doi.org/10.1080/02656736.2019.1592242>
- [32] Cun, J.P., Fan, H.J., Zhao, W., Yi, G.F., Jiang, Y.N. and Xie, X.C. (2019) Factors Influencing MR Changes Associated with Sacral Injury after High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Uterine Fibroids. *International Journal of Hyperthermia*, **36**, 21-28. <https://doi.org/10.1080/02656736.2018.1528391>
- [33] Bitton, R.R., Fast, A., Vu, K.N., Lum, D.A., Chen, B., Hesley, G.K., Raman, S.S., Matsumoto, A.H., Price, T.M., Tempany, C., Dhawan, N., Dolen, E., Kohi, M., Fennessey, F.M. and Ghanouni, P. (2023) What Predicts Durable Symptom Relief of Uterine Fibroids Treated with MRI-Guided Focused Ultrasound? A Multicenter Trial in 8 Academic Centers. *European Radiology*, **33**, 7360-7370. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09984-4>
- [34] Sainio, T., Saunavaara, J., Komar, G., Mattila, S., Otonkoski, S., Joronen, K., Perheentupa, A. and Blanco Sequeiros, R. (2021) Feasibility of Apparent Diffusion Coefficient in Predicting the Technical Outcome of MR-Guided High-Intensity Focused Ultrasound Treatment of Uterine Fibroids—A Comparison with the Funaki Classification. *International Journal of Hyperthermia*, **38**, 85-94. <https://doi.org/10.1080/02656736.2021.1874545>
- [35] Jiang, Y., Qin, S., Wang, Y., Liu, Y., Liu, N., Tang, L., Fang, J., Jia, Q. and Huang, X. (2023) Intravoxel Incoherent Motion Diffusion-Weighted MRI for Predicting the Efficacy of High-Intensity Focused Ultrasound Ablation for Uterine Fibroids. *Frontiers in Oncology*, **13**, Article 1178649. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1178649>
- [36] 周芳露, 吕富荣, 吕发金, 等. 术前 DTI 纤维束示踪成像定量参数与高强度聚焦超声消融子宫肌瘤疗效的相关性研究[J]. 临床放射学杂志, 2020, 39(1): 206-211.
- [37] 张新, 程启超, 管玥, 等. 基于 DTI 评估子宫肌瘤 HIFU 治疗后对周边肌层的影响[J]. 医学影像学杂志, 2020,

30(12): 2274-2276, 2280.

- [38] Zheng, Y., Chen, L., Liu, M., Wu, J., Yu, R. and Lv, F. (2021) Nonenhanced MRI-Based Radiomics Model for Preoperative Prediction of Nonperfused Volume Ratio for High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Uterine Leiomyomas. *International Journal of Hyperthermia*, **38**, 1349-1358. <https://doi.org/10.1080/02656736.2021.1972170>
- [39] Zhang, J., Yang, C., Gong, C., Zhou, Y., Li, C., and Li, F. (2022) Magnetic Resonance Imaging Parameter-Based Machine Learning for Prognosis Prediction of High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Uterine Fibroids. *International Journal of Hyperthermia*, **39**, 835-846. <https://doi.org/10.1080/02656736.2022.2090622>
- [40] Zhou, Y., Zhang, J., Chen, J., Yang, C., Gong, C., Li, C. and Li, F. (2022) Prediction Using T2-Weighted Magnetic Resonance Imaging-Based Radiomics of Residual Uterine Myoma Regrowth after High-Intensity Focused Ultrasound Ablation. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, **60**, 681-692. <https://doi.org/10.1002/uog.26053>
- [41] Zheng, Y., Chen, L., Liu, M., Wu, J., Yu, R. and Lv, F. (2021) Prediction of Clinical Outcome for High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Uterine Leiomyomas Using Multiparametric MRI Radiomics-Based Machine Learning Model. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article 618604. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.618604>