

多模态MRI成像特征的综合评分在前列腺癌诊断中的研究进展

霍宏雁, 孟 姮*

北华大学附属医院(三甲)急诊一楼CT科, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年7月26日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年8月28日

摘 要

前列腺癌(patient-controlled analgesia, PCA)是男性常见的恶性肿瘤, 其发病率居男性首位, 早发现、早治疗是提高疗效的关键。多模态MRI是集T2加权成像(T2-weighted imaging, T2WI)、扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)、动态对比增强(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE)及磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)为一体的影像学方法。而多参数磁共振成像(multiparametric magnetic resonance imaging, mpMRI)是目前无创诊断、分期和风险分层的核心技术。对mpMRI的综合评分应用进展进行综述, 有助于临床医生、影像科医生及相关研究人员快速了解该领域的核心概念和前沿动态, 对规范临床实践、提高诊断准确性具有积极作用。

关键词

多模态MRI成像特征, 综合评分, 前列腺癌诊断, 研究进展

Research Progress of Comprehensive Scoring of Multimodal MRI Imaging Features in the Diagnosis of Prostate Cancer

Hongyan Huo, Heng Meng*

Department of CT, First Floor Emergency Department, Beihua University Affiliated Hospital (Grade III), Jilin Jilin

Received: Jul. 26th, 2025; accepted: Aug. 19th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 霍宏雁, 孟姮. 多模态 MRI 成像特征的综合评分在前列腺癌诊断中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(8): 1924-1929. DOI: 10.12677/acm.2025.1582442

Abstract

Prostate cancer (patient-controlled analgesia, PCA) is a common malignant tumor in men, and its incidence rate ranks first among men. Early detection and early treatment are the keys to improving the therapeutic effect. Multimodal MRI integrates T2-weighted imaging (T2WI) and Diffusion-weighted imaging (diffusion-weighted imaging) DWI, dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging (DCE), and an imaging method integrating magnetic resonance spectroscopy (MRS). Multiparametric magnetic resonance imaging (mpMRI) is currently the core technology for non-invasive diagnosis, staging and risk stratification. A review of the application progress of the comprehensive score of mpMRI is helpful for clinicians, radiologists and related researchers to quickly understand the core concepts and cutting-edge trends in this field, which has a positive effect on standardizing clinical practice and improving diagnostic accuracy.

Keywords

Multimodal MRI Imaging Features, Comprehensive Score, Diagnosis of Prostate Cancer, Research Progress

Copyright © 2025 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

前列腺癌是老年男性易患的恶性肿瘤之一,近年来随着我国整体居民生活质量的提升、生活方式的改变,前列腺癌的发病率和检出率均有所提高,且呈低龄化趋势。前列腺癌早期往往没有明显的临床表现,当被诊断为中、晚期时,往往会给患者带来很大的困扰。前列腺癌诊断的“金标准”为有创检查,存在感染、出血等风险。因此,探索高效、无创性的检测手段对前列腺癌的早期诊断具有较大的临床价值。多模态 MRI 成像技术可以获取前列腺的解剖结构、血流动力学和代谢等信息,可以有效地提高前列腺癌的检测率及诊断准确率。

2. 多模态 MRI 的技术原理和成像特征

2.1. T2 加权成像(T2WI)

T2 加权成像依赖于自旋-回波波(SE)或快自旋-回波波(TSE)序列,可获得长 TR(>3000 ms)和长 TE (80~120 ms)的 T2 加权像差,从而获得高分辨的 MRI 图像。正常前列腺周围带(PZ)具有较高的含水量, T2 持续时间较长,表现为均一的高信号;中心腺体(Central Gland, CG)呈中低型,主要表现为腺体、平滑肌和纤维基质混合。病理上,前列腺癌的病理特征是腺泡结构被破坏,细胞密度增加,基质中的胶原沉积,使其 T2 像变短,出现局部或弥散性的低信号。文献报道 PZ 区 0.5 cm 以上的肿瘤病灶 T2 加权像是 0.73~0.88,但其特异性只有 0.46~0.69,这是因为在慢性前列腺炎,梗死,穿刺后出血和良性增生等疾病中都有类似的表现[1]。为了降低漏诊率,PI-RADS2.1 版需要结合横断面、冠状和矢状面的高分辨 T2WI (层厚 ≤ 3 mm)来评估病变的形态、包膜与储精囊的浸润情况。建议将其与功能性序列结合,提高对前列腺癌和结节的鉴别诊断。

2.2. 扩散加权成像(DWI)和表观扩散系数(Apparent Diffusion Coefficient, ADC)

DWI 是以斯捷斯卡-坦纳脉冲梯度旋转回波为基础, 对水分子布朗运动进行无损检测; 通过至少两个 b 值(典型地 $0.800\sim 2000\text{ s/mm}^2$)获得信号强度的差值, 并计算 ADC 的数值。肿瘤细胞的核浆比例增大, 细胞外间隙变小, 从而限制了水分子的弥散, 从而造成 DWI 高信号而 ADC 低信号的现象。元分析结果表明, 对于 csPCa, DWI 合计敏感性 0.91 (95% CI 0.88~0.93)和 0.86 (95% CI 0.83~0.88); 在 $0.75\sim 0.90 \times 10$ 立方/秒的 ADC 阈值范围内, AUC 可以达到 0.94。但是, 前列腺炎, 疤痕, 以及内分泌治疗后的萎缩也可能造成扩散受限, 从而造成假阳性。高 b 值($\geq 1500\text{ s/mm}^2$)和超高 b (3000 s/mm^2)可以有效改善肿瘤与背景的对比值, 但需要考虑到信噪比的降低[2]。DWI 联合 DKI 和 IVIM 模型能更好地区分低级别和高级别肿瘤, 且两者的平均弥散峭度与 Gleason 积分成正比($r = 0.62, P < 0.001$)。

2.3. 动态造影增强(Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging, DCE-MRI)

DCE-MRI 是以三维快速梯度回波(Three-Dimensional Fast Gradient Recalled Echo, GRE)序列为基础, 经静脉给药 0.1 mmol/kg , $2\sim 3\text{ mL/s}$, 进行多时相动态获取(每次 $10\sim 15$ 秒, 累计时间 ≥ 5 分钟)。前列腺癌血管密度高, 其基底膜不完整, 造影剂呈“早快速推进-早清除”的动态变化。前期研究发现, Tofts 模型中的 K_{trans} 、 V_e 与微血管密度(Microvessel Density, MVD)和 VEGF 的表达具有明显的相关性[3]。系统回顾显示 DCE-MRI 对 csPCa 的诊断敏感性为 0.74, 特异性为 0.88; 结合 DWI, 敏感性提高到 0.91, 5 mm 以下病变的检出率从 43%提高到 69%。然而, DCE 对于中心腺体癌的检出率仍然很低(大约 55%), 并且由于 BPH 所致的增生血管的影响, 需要联合 T2WI 和 ADC 来进行鉴别。

2.4. 核磁共振波谱(MRS)

采用点分辨光谱(Point-RESolved Spectroscopy, PRESS)或者激励回波采集模式(STimulated Echo Acquisition Mode, STEAM)技术, 采用化学位移原理, 在 $1.5\sim 3\text{ T}$ 的磁场条件下, 测定前列腺中的前列腺代谢产物: 柠檬酸(2.6 ppm), 胆碱(3.2 ppm), 肌酸(3.0 ppm)。正常外周血中 Cit 含量较高($>20\text{ mmol/kg}$), 肿瘤组织中 Cho 升高, Cit 下降, 这是由于线粒体数量减少, 细胞膜磷脂合成增多, $\text{Cho/Cit} > 1.5$ 者为恶性肿瘤。已有研究表明, 对 0.5 cm 以上的病灶, 单体素 MRS 的特异性可达到 0.90, 而敏感性只有 0.63; 多体素三维磁共振成像技术可以达到全腺的检测, 其敏感度可提高到 0.78 [4]。但目前的成像技术存在成像分辨率不高($1\sim 2\text{ cm}^3$)、磁场均匀性和脂肪抑制效应等问题, 需要 $10\sim 15$ 分钟才能完成。所以在现代 PI-RADS 中, MRS 被作为选择性的检查方法, 它被作为评价中心型腺体癌或术后复发的方法。

3. 多模态 MRI 技术的优劣和争议

T2WI 因其可获得较高的解剖结构, 在鉴别前列腺周缘(PZ)与中央腺区(CG)方面有较大的应用价值。其高信号特点可清晰地显示前列腺的解剖结构, 对前列腺疾病的早期筛查具有重要意义。由于 T2WI 特异性差, 易被非肿瘤性病变如慢性前列腺炎、穿刺后出血及良性增生所干扰。T2WI 对微小病变的检出能力有限, 易漏诊。虽然 T2WI 是前列腺造影的基本功能, 但是它的独立应用价值仍存在争议。联合使用 DWI、DCE-MRI 等多种影像技术可有效提升影像学诊断准确率, 但多模式影像联合应用尚有较大争议。DWI 能较好地检出前列腺癌, 特别是对微小病变具有较好的诊断价值。其灵敏度高达 0.91, 特异性高达 0.86, 是目前前列腺癌最有效的检测手段。同时, 采用高 b 值、超高 b 值可以进一步改善肿瘤与背景之间的反差。DWI 易受非肿瘤性病变的影响, 如前列腺炎及内分泌治疗后出现萎缩, 造成较高的假阳性。另外, 在使用高值时, 在增强反差的同时, 也会使信噪比下降, 从而对成像质量产生不利影响。DWI 与 DKI 及 IVIM 相结合可更好地区分低度恶性与恶性程度, 但目前该方法尚在探索中, 且受限于影像处理速度

及技术复杂程度。

DCE-MRI 是一种新型磁共振成像技术,其可以精确地反映肿瘤新生血管的形成过程,并与微血管密度等指标呈正相关。DCE-MRI 与 DWI 联合应用能明显提高微小病灶的检出率。DCE-MRI 对中央腺体癌的检出率易受 BPH 影响。另外, DCE-MRI 显像耗时,需注入对比剂,给患者带来不适,并存在安全隐患。由于 DCE-MRI 对中央腺体癌的检出率较低,严重制约 DCE-MRI 对前列腺癌的诊断价值。因此,如何优化 DCE-MRI 影像参数及模型,提升 DCE-MRI 在中央腺体癌诊断中的应用潜力。另外, DCE-MRI 与其他影像技术(如 T2WI)的结合方式也有待于探索。MRS 技术可实时监测体内代谢物(如柠檬酸、肌酸等)的改变,为癌症的诊断和治疗提供新的思路。其能较好地将肿瘤与正常组织区分,特别是对中央型腺癌及术后复发的评价。另外, MRS 对磁场均匀性等方面的需求也较高,难以实现。MRS 对肿瘤代谢的研究虽有其独到的优点,但受限於成像速度及技术复杂程度,其在临床上的应用受到极大的限制。如何在降低对仪器设备的需求的前提下,进一步提升磁共振成像的分辨率与效率,是磁共振成像领域的重要问题。

4. 在前列腺癌诊断中多模态 MRI 成像特征的综合评分的应用

4.1. PI-RADS v2.1 评分系统

PI-RADS v2.1 是由 ACR、ESUR 和 AdMeTech 联合发布的基于结构化的前列腺 mpMRI 报告系统。其要求建立 3.0 T 扫描设备,层厚 ≤ 3 mm,高分辨率 T2WI、DWI($b \geq 1000$ S/mm²)和动态增强扫描(DCE)。其分级标准是外侧周带和移行区: DWI 是主要序列,移行区是 T2WI, DCE 只是一个“修正器”。研究显示, PCa/cspCa 组和 BPH 组在年龄、游离前列腺特异性抗原(fPSA)、游离前列腺特异性抗原、前列腺体积(PV)、前列腺成像报告和数据系统评分(PI-RADS)等较差异, ($P < 0.05$) [5]。

4.2. 其他综合评分模型

除了 PI-RADS, 研究人员还试图在综合量表中加入量化或临床指标。磁共振成像评估的前列腺癌包膜外侵犯(mpMRI-determined extraprostatic extension, mEPE)定量评估肿瘤组织中神经-血管不对称性、直肠-前列腺角消失等 T2WI 信号,建立 0~4 等级,通过体外验证($n=518$), AUC 为 0.83,较 PI-RADS 单独 0.74 高。另外,前列腺特异性抗原密度-前列腺影像报告与数据系统联合评分(Prostate-Specific Antigen Density-Prostate Imaging Reporting and Data System, PSAD-PI-RADS)将 PSA 浓度乘以 PI-RADS 等级($PSAD \geq 0.15$ ng/mL/厘米³)。

5. 在前列腺癌诊断中多模态 MRI 综合评分的临床价值

前列腺癌是继肺癌之后发病率和死亡率最高的恶性肿瘤,其早期临床表现并不显著,容易与前列腺炎和前列腺增生等疾病相混淆,一旦误治延误,预后较差。提高前列腺癌的早期诊断率,对于改善患者的生活质量和改善长期预后意义重大。前列腺组织活检术是诊断前列腺癌病变的常用方法,但其漏诊率高,易造成患者心理压力[6]。MRI 由于其在组织中的高分辨能力,被公认为是目前最理想的前列腺癌诊断方法。T2WI 序列是目前临床上常用的影像学检查方法,虽然前列腺癌常呈低信号,但也可见于前列腺炎等病变,极大地降低了诊断的特异性。前期研究发现,T2 加权像对于移行带癌检出率高,敏感性 74.58%,特异性为 72.22%,与文献报道相符[7]。磁共振功能影像学(DWI, DCE-MRI)逐渐被用于前列腺癌的早期诊断。DWI 是一种定量的诊断方法,通过测定水分子的弥散情况来判断病灶的性质和程度。

正常前列腺在 DWI 上表现为低信号,其 ADC 值随肿瘤细胞浸润而逐渐升高,ADC 值显著下降。但是,前列腺癌和 BPH 在 DWI 上有很大的重合,单独使用 DWI 具有一定的局限性。DWI 联合 ADC 值对前列腺癌的诊断敏感性、特异性和准确性分别为 81.36%、75.00%和 78.95% [8]。DCE-MRI 能反映血液流

动的动态变化、肿瘤内新生血管的变化, 同时也能反映肿瘤的发生发展过程, 其中恶性肿瘤具有快速上升、快速下降的特点。然而, DCE-MRI 也有一定的局限性, 如空间分辨率不高, 移行带的良性和恶性的增强特征相互叠加。前期研究发现, DCE-MRI 成像显示 PCa 表现为非均匀增强, TIC 曲线主要表现为上升-下降型, 对 PCa 的诊断敏感性为 79.66%, 特异度为 63.89%, 准确率为 73.68% [9]。在磁共振成像技术的发展下, 核磁共振(mp-MRI)是一种集解剖学和功能影像为一体的影像学。研究表明, 与潘金万等的研究结果相吻合, mp-MRI 对前列腺癌的敏感性、准确性及阴性预测值都较单独检测高($P < 0.05$) [10]。但是, 该研究也有其局限性, 如没有根据患者的年龄和性别进行分析, 因此, 在诊断准确率上可能会有不同。结论: T2WI, DWI, DCE-MRI 各自具有各自的特点, 而 mp-MRI 可以从多个视角展示前列腺的解剖结构、生理生化代谢等, 提高前列腺癌的特异性和敏感性。

6. 在前列腺癌诊断中多模态 MRI 成像特征的综合评分的前景

6.1. 技术标准化和设备差异

多模态 MRI 技术规范是实现前列腺癌高精度诊断的先决条件, 但目前存在仪器不同、成像参数不一致等问题。PI-RADS2.1 版特别建议采用 3.0 T 磁共振成像系统, 保证成像质量, 特别是 DWI 序列。但 1.5 T 磁共振成像技术仍然是我国基层医院和资源匮乏的主要手段, 大部分医疗机构依靠 1.5 T 磁共振成像来进行。目前, 制约我国医疗卫生事业发展的主要瓶颈是基层医院面临的资源限制和技术缺口。1.5 T 装置的推广应用虽然降低了进入该领域的门槛, 但是由于 DWI 序列信噪比的不同, 使得 ADC 值的解释存在较大的误差。EUROSAFE 在多中心使用的实践证明, 除了要统一扫描参数之外, 还需要构建仪器标定溯源系统, 并对 1.5 T 和 3.0 T 两种仪器进行定期数据校验。研究“3.0 T 三甲医院 + 1.5 T 基层网点”的分层质量控制模型, 利用远程图像会诊平台, 实时调整患者病情, 并与设备制造商合作, 研发 1.5 T 以下的轻量化影像方案, 在确保关键特征提取的同时, 降低了技术门槛。

6.2. 阅片者间一致性

多模态 MRI 技术综合评分在很大程度上依赖于判读的一致性, 而由于主观评判的不同而引起的阅片个体差异仍然是该方法推广应用的重要原因。人工智能的出现为该问题的解决开辟了一条新的途径。为了提高阅片率, 必须打破传统“AI 替代医生”的认识误区, 建立“人机协同”的医患互信机制, 提高阅片率。基层医师对人工智能研究成果的接受程度常常受到“黑箱”决定的限制, 即当人工智能和临床诊断发生矛盾时, 由于缺少合理的解释基础, 患者的依从性就会下降。构建分级诊疗的动态评价机制, 将 AI 预分值与医师评价结果的匹配度作为考评标准, 采用“典型案例 + 双盲交叉评审”的方式加强培训, 逐渐缩小各等级医院的判读差异, 实现基层医师评分的一致性。

6.3. 多模态数据整合和 AI 融合

目前以 PI-RADS 为代表的集成打分体系, 多依靠人为设定的信号强度、DWI 高信号区等定性特征, 很难对图像中的深层信息进行深度挖掘。与此形成鲜明对比的是, 人工智能利用深度学习算法, 可以从多模态磁共振图像中自动提取出量化特征(纹理参数、灌注曲线形态等), 从而提高磁共振成像的诊断性能。多源信息融合技术将成为该领域研究的重要发展趋势。多模态数据集成面临的关键问题是跨模态特征间的关联关系建模和数据隔离。目前, 多中心数据库在构建过程中存在隐私保护、数据格式异构(如 DICOM 等)等问题, 严重影响了数据集成的有效性。因此, 提出“多模态磁共振 + PSAD + 基因标志物”模式下的“多模态磁共振 + PSAD + 基因标志物”的决策逻辑。

6.4. 治疗后监测和疗效评估

多模态 MRI 技术对前列腺癌疗效监控的价值正在逐渐显示出来, 但其临床依据还有待进一步提高。前列腺癌根治手术后, 20%~30%的患者会发生生化反应, 而常规的影像技术很难对其进行早期诊断。DWI 和 T2WI 联合检测术后生化复发敏感性明显高于单纯 T2WI 序列, 并且 ADC 下降幅度与 Gleason 积分成正比。在放射治疗后, 在 DCE-MRI 中, K_{trans} 降低, 提示治疗有效。目前的研究存在样本量小和随访时间短的问题, 迫切需要大样本、多中心的临床研究来证实。CACA 的 PCa 指南中建议, 多模态磁共振成像技术的全面评价是 PCa 治疗后的常规监测指标, 并建议在术后 6~12 月复查一次, 以评估前列腺床和盆腔淋巴结。针对基层医疗机构, 探索“多模态 MRI 常规追踪 + 血清指标快速测定”联合模式, 利用 MRI 捕获解剖结构改变, 结合 PSA 浓度(PSAD), 辅助评估生化复发风险, 减少 PET-MRI 等昂贵检测费用, 建立涵盖治疗过程的闭环监控体系。

7. 结论

总之, 多模态 MRI 成像特征的综合评分通过整合解剖结构、功能和代谢等多种信息, 极大地提高了 PCa 的诊断精度, 提高了临床治疗水平。以 PI-RADS v2.1 为代表的多模态磁共振成像技术(PI-RADS v2.1)是目前临床上最主要的检查手段, 可以有效降低不必要的活检次数, 提高 csPCa 的检出率, 引导临床精准诊疗。虽然目前存在着技术标准化等方面的问题, 但基于多模态信息的人工智能辅助诊断为前列腺癌的精确诊断开辟了新的途径。发展多模态 MRI 成像技术, 为前列腺癌的早期诊断、早期治疗、个性化治疗提供新的思路。

参考文献

- [1] 金成锋, 张志刚. T2 加权成像与扩散加权成像技术对移行带前列腺癌的诊断价值[J]. 浙江创伤外科, 2024, 29(6): 1165-1167.
- [2] 汪博. 1.5TMR 动态增强成像联合扩散加权成像及 T2 加权成像对前列腺癌的诊断价值探讨[J]. 中国实用医药, 2022, 17(19): 34-38.
- [3] Baur, A.D.J., Schwabe, J., Rogasch, J., Maxeiner, A., Penzkofer, T., Stephan, C., 郑孝飞. 超声造影与动态增强 MRI 在前列腺癌检测及侵袭性预测中的直接比较[J]. 国际医学放射学杂志, 2018, 41(4): 488.
- [4] 贺玉生. 核磁共振波谱成像在老年前列腺癌与良性前列腺增生鉴别诊断中的价值分析[J]. 医药前沿, 2021, 11(14): 97-98.
- [5] 刘涛, 宋玲先, 张涛. 双模态磁共振 PI-RADSv2.1 评分系统联合临床及生化指标对前列腺癌的诊断效能探讨[J]. 宁夏医学杂志, 2024, 46(11): 941-944.
- [6] 蔡怀杰, 曾志雄, 吴秀明, 等. 直肠超声引导下徒手经会阴前列腺穿刺术的个人学习曲线分析[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32(9): 913-917.
- [7] 盛伟华, 黄松, 冯军屏, 等. MRI 多模态分级影像报告对前列腺外周带癌的诊断价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(10): 109-111.
- [8] Radtke, J.P., Schwab, C., Wolf, M.B., Freitag, M.T., Alt, C.D., Kesch, C., *et al.* (2016) Multiparametric Magnetic Resonance Imaging (MRI) and MRI-Transrectal Ultrasound Fusion Biopsy for Index Tumor Detection: Correlation with Radical Prostatectomy Specimen. *European Urology*, **70**, 846-853. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2015.12.052>
- [9] 陆健美, 葛建钢, 王静, 等. 联合应用 3.0T 磁共振 T2WI, DWI 及 DCE-MRI 成像诊断前列腺癌[J]. 实用肿瘤杂志, 2020, 35(4): 355-359.
- [10] 季微, 严佳, 顾峰, 陆健美, 贲亮亮, 王静, 王小乐. 基于多模态 MRI 成像特征的综合评分在前列腺癌诊断中的价值[J]. 世界复合医学(中英文), 2024, 10(7): 134-138.