

· 临床研究 ·

# DCE MRI、DWI 联合 PI-RADS v2.1 评分对 PSA 灰区前列腺良恶性病变的诊断价值

谢清, 姚伟根, 傅娇姣, 鲁鹏聪, 刘洁, 康聪, 胡稳

**【摘要】目的** 探讨动态对比增强磁共振成像(DCE MRI)、弥散加权成像(DWI)联合第2版前列腺影像报告与数据系统(PI-RADS v2.1)评分对前列腺特异性抗原(PSA)灰区( $4\text{ ng/ml} \leq \text{PSA} < 10\text{ ng/ml}$ )前列腺良恶性病变的诊断价值。**方法** 收集2018年9月至2022年12月余姚市人民医院收治的PSA灰区且行前列腺DCE MRI及DWI扫描的前列腺癌(PCa)或前列腺增生(BPH)患者113例,其中PCa 42例,BPH 71例。以PI-RADS v2.1标准进行评分,DCE MRI数据经处理软件得到量化参数[转运常数( $K_{\text{trans}}$ )、速率常数( $K_{\text{ep}}$ )、血管外细胞外间隙体积百分数( $V_e$ )及初始强化曲线下面积( $i\text{AUC}$ )]。DWI扫描获得表观扩散系数(ADC)图,并得到ADC量化参数,即病灶的最小ADC( $\text{ADC}_{\text{min}}$ )、最大ADC( $\text{ADC}_{\text{max}}$ )、平均ADC( $\text{ADC}_{\text{ave}}$ ),由病灶 $\text{ADC}_{\text{ave}}$ /邻近正常组织 $\text{ADC}_{\text{ave}}$ 得到ADC比值( $\text{ADC}_{\text{ratio}}$ )。采用Logistic回归分析构建预测PCa的诺模图模型,绘制ROC曲线并计算曲线下面积(AUC)评估模型诊断效能,绘制校准曲线、决策曲线(DCA)评估模型临床应用价值。**结果** PI-RADS v2.1评分、 $\text{ADC}_{\text{ave}}$ 、 $K_{\text{trans}}$ 为PCa的独立预测因子,其构建的诺模图模型的AUC为0.981。DCA显示模型在区分PCa与BPH方面具有很高的总体净获益。**结论** DCE MRI和DWI的量化参数结合PI-RADS v2.1评分对PSA灰区前列腺良恶性病变具备较高的诊断价值,能够避免不必要的穿刺活检。

**【关键词】** 动态对比增强磁共振成像;磁共振弥散加权成像;前列腺影像报告与数据系统;前列腺癌;前列腺增生  
doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2024.10.012

**【中图分类号】** R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-0800(2024)10-1308-04

前列腺癌(prostate cancer, PCa)是男性泌尿生殖系统最常见的恶性肿瘤,发病率居全球男性恶性肿瘤的第2位,死亡率居第5位<sup>[1]</sup>。血清前列腺特异性抗原(prostate-specific antigen, PSA)是目前PCa筛查及监测的最常用指标<sup>[2]</sup>,但特异性相对低。有研究表明,在 $4\text{ ng/ml} \leq \text{PSA} < 10\text{ ng/ml}$ 这一诊断PCa的“灰区”,仅1/4患者被证实患有PCa<sup>[3]</sup>。多参数磁共振成像(multi-parameter magnetic resonance imaging, mpMRI)是PCa诊断的首选影像学手段<sup>[4]</sup>。前列腺影像报告与数据系统(PI-RADS)指导委员会于2019年发布了基于mpMRI的前列腺影像报告和数据系统(PI-RADS V2.1),用于PCa的诊断<sup>[5]</sup>,但其受诊断医师的主观影响较大<sup>[6]</sup>。研究表明,动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE MRI)的量化参数不仅有助

于鉴别前列腺病灶的良、恶性,还能在一定程度上预估PCa的病理分级<sup>[7]</sup>。并且,增加表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)序列可以提高PCa检测和定位的准确性<sup>[8]</sup>。本研究拟探讨DCE MRI、弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)联合PI-RADS v2.1评分对PSA灰区前列腺良恶性病变的诊断价值,现报道如下。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 收集2018年9月至2022年12月余姚市人民医院收治的PSA在灰区且行前列腺DCE MRI及DWI扫描的PCa或前列腺增生(benign prostatic hyperplasia, BPH)患者113例,其中PCa 42例,BPH 71例;年龄44~90岁,平均(70.0±8.2)岁。纳入标准:(1)经超声引导下前列腺系统穿刺活检或手术后病理证实为PCa或BPH;(2) $4\text{ ng/ml} \leq \text{PSA} < 10\text{ ng/ml}$ ;(3)行前列腺常规MRI、DCE MRI及多b值(0、500、1 500、2 000)DWI检查,参数完整;(4)血清PSA检测及MRI检查前未进行过前列腺穿刺、手术、放射治疗或内分泌治疗等;(5)于血清PSA检测

**基金项目:** 余姚市科技计划项目(2023YZD02);宁波市影像医学临床医学研究中心开放基金项目(2022LYKFYB06)

**作者单位:** 315211 宁波,宁波大学医学部(谢清);余姚市人民医院(谢清、姚伟根、傅娇姣、鲁鹏聪、刘洁、康聪、胡稳)

**通信作者:** 姚伟根, Email: yyfsk456@qq.com

及MRI检查后2周内行活检或手术。排除标准:(1)存在MRI禁忌证者;(2)影像学资料不完善或图像质量差者;(3)合并身体其他部位恶性肿瘤者;(4)有过前列腺治疗病史者。本研究获得余姚市人民医院医学伦理委员会批准,豁免/免除知情同意。

## 1.2 方法

1.2.1 前列腺穿刺和病理诊断 经会阴超声引导下进行前列腺穿刺,采取标准前列腺10点+X穿刺法,或行前列腺外科手术。术后立即送病理科行常规病理检查和免疫组织化学检查。

1.2.2 DCE MRI 和 DWI 扫描方案 采用德国西门子1.5 T 64通道MRI扫描仪(Aera)完成扫描。患者平卧位,脚先扫描。18通道相控阵线圈置于骨盆正上方结合32通道脊柱Tim线圈共同完成信号采集。常规MRI扫描序列包括T<sub>1</sub>加权成像(T<sub>1</sub>WI)、T<sub>2</sub>加权脂肪抑制成像(T<sub>2</sub>WFS)、三维容积内插梯度回波(VIBE)和DWI。VIBE序列重复时间(TR)4.52 ms,回波时间(TE)1.43 ms,翻转角度(FA)10°,平均次数2,采集矩阵224×179×150,扫描视野(FOV)280 mm×280 mm,层厚3 mm,时间分辨率12 s,扫描回合20。VIBE扫描第一回合为平扫,从第二回合开始以3 ml/s的速度用高压注射器注射磁共振对比剂钆双胺注射液(OMNISCAN),剂量为0.2 ml/kg,然后再用20 ml 0.9%氯化钠注射液冲洗。DWI序列参数为:b值为0、500、1 500及2 000,对应Average为1、1.4及22,TR 4 000 ms,TE 85 ms,FA 90°,层厚4 mm,FOV 240 mm×240 mm,采集矩阵180×180。

1.2.3 图像分析 (1)图像上传至医学影像信息系统(PACS)上,由2名经过PI-RADS v2.1标准训练的放射科中级职称医师独立完成阅片并进行评分,对评分不一致者经由第3名放射科高级职称医师确定。对多灶性病变,以评分最高值作为最终评分。(2)在西门子 Syngo.via 工作站上进行图像后处理:DWI扫描获得ADC图,通过对照mpMRI其他序列及病理结果,在ADC图上描绘感兴趣区域(region of interest, ROI),同时将精囊、血管、钙化、出血和伪影排除在ROI之外,并测定多个ADC量化参数(ADC<sub>min</sub>、ADC<sub>max</sub>、ADC<sub>cave</sub>及ADC<sub>ratio</sub>)。DCE MRI图像用Tissue4D进行量化分析,药代动力学模型选择Tofts模型,得到血管通透性参数,即转运常数

(volume transfer constant, K<sub>trans</sub>)、速率常数(rate constant, K<sub>ep</sub>)、血管外细胞外间隙体积百分数(extravascular extracellular volume fraction, Ve)及初始强化曲线下面积(integrated area under curve, iAUC)。结节性病灶尽可能包括整个病变范围,但不超出病变范围;对多灶性病变,选取直径最大的病灶进行测量。ROI由另一位有经验的高年资影像科医师检查。

1.2.4 模型构建 采用单因素和多因素Logistic回归分析构建预测模型,并且绘制诺模图将模型可视化。通过绘制ROC曲线并计算曲线下面积(area under curve, AUC)评估模型的诊断效能,绘制校准曲线、决策曲线(decision curve analysis, DCA)评估模型的临床价值。

1.3 统计方法 数据采用Python软件(版本3.8.5)分析,诺模图采用R语言(版本4.2.2, R Foundation for Statistical Computing)构建。计量资料服从正态分布以均数±标准差表示,采用t检验;非正态分布以M(P<sub>25</sub>, P<sub>75</sub>)表示,采用Mann-Whitney U检验。计数资料比较采用χ<sup>2</sup>检验。P < 0.05表示差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 基线资料比较 PCa组和BPH组年龄、Ve差异均无统计学意义(均P > 0.05);PCa组的PI-RADS v2.1评分、DCE MRI的K<sub>trans</sub>、K<sub>ep</sub>和iAUC值高于BPH组,PCa组DWI的ADC<sub>max</sub>、ADC<sub>min</sub>、ADC<sub>cave</sub>和ADC<sub>ratio</sub>值低于BPH组,差异均有统计学意义(均P < 0.05),见表1。

2.2 相关性分析 将PI-RADS v2.1评分、K<sub>trans</sub>、K<sub>ep</sub>、iAUC、ADC<sub>max</sub>、ADC<sub>min</sub>、ADC<sub>cave</sub>和ADC<sub>ratio</sub>纳入变量相关性分析,见图1,剔除相关性较高参数(r > 0.7),将PI-RADS v2.1评分、K<sub>trans</sub>、K<sub>ep</sub>、ADC<sub>cave</sub>纳入下一步研究。

2.3 构建模型 将PI-RADS v2.1评分、K<sub>trans</sub>、K<sub>ep</sub>、ADC<sub>cave</sub>这4个参数纳入单因素和多因素Logistic分析,以确定PCa的独立预测因子。结果显示,PI-RADS v2.1评分、K<sub>trans</sub>及ADC<sub>cave</sub>均为PCa的独立预测因子(均P < 0.05),见表2。

2.4 模型可视化 基于PI-RADS v2.1评分、K<sub>trans</sub>、ADC<sub>cave</sub>构建PCa的诺模图模型,见图2。绘制模型ROC曲线,AUC为0.981,见图3。

表1 PCa组和BPH组基线资料比较

变量	PCa组(n=42)	BPH组(n=71)	t(χ²)[Z]值	P值
年龄(岁)	70.2±7.6	69.8±8.5	0.24	> 0.05
PI-RADS v2.1 评分(例)			(72.88)	< 0.05
1分	0	12		
2分	1	33		
3分	5	21		
4分	17	3		
5分	19	2		
Ktrans(/min)	0.15±0.04	0.13±0.04	3.10	< 0.05
Kep(/min)	0.67(0.53, 0.86)	0.54(0.41, 0.68)	[3.28]	< 0.05
Ve	0.24±0.12	0.26±0.09	0.95	> 0.05
iAUC	0.16±0.04	0.14±0.04	2.85	< 0.05
ADCmax(×10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup> /s)	0.7±0.12	0.92±0.12	9.37	< 0.05
ADCmin(×10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup> /s)	0.45±0.13	0.6±0.14	5.87	< 0.05
ADCave(×10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup> /s)	0.57±0.11	0.76±0.12	8.34	< 0.05
ADCratio	0.55±0.12	0.71±0.1	7.35	< 0.05

注:PI-RADS v2.1为前列腺影像报告与数据系统v2.1,Ktrans为转运常数,Kep为速率常数,Ve为血管外细胞外间隙体积百分数,iAUC为初始强化曲线下面积,ADCmin为病灶的最小ADC,ADCmax为病灶的最大ADC,ADCave为病灶的平均ADC,ADCratio为病灶ADCave/邻近正常组织ADCave得到的ADC比值

表2 PCa的独立预测因子 Logistic 回归分析

变量	单因素分析		多因素分析	
	OR值(95%CI)	P值	OR值(95%CI)	P值
Ktrans	1.162×10 <sup>7</sup> (283.928 ~ 1.344×10 <sup>12</sup> )	< 0.05	8.551×10 <sup>14</sup> (813.279 ~ 8.617×10 <sup>20</sup> )	< 0.05
Kep	22.903(4.018 ~ 169.245)	< 0.05	0.351(0.024 ~ 27.336)	> 0.05
ADCave	1.376×10 <sup>-7</sup> (1.500×10 <sup>-10</sup> ~ 2.973×10 <sup>-5</sup> )	< 0.05	1.650×10 <sup>-8</sup> (1.811×10 <sup>-13</sup> ~ 7.644×10 <sup>-5</sup> )	< 0.05
PI-RADS v2.1	9.301(4.693 ~ 22.788)	< 0.05	8.338(3.464 ~ 29.054)	< 0.05

注:PI-RADS v2.1为前列腺影像报告与数据系统v2.1,Ktrans为转运常数,Kep为速率常数,ADCave为病灶的平均ADC

2.5 模型应用评估 校准曲线显示模型的预测概率与实际概率一致性良好,见封三图2。DCA显示模型在区分PCa与BPH方面具有很高的总体净获益,模型有良好的临床应用潜能,见封三图3。

### 3 讨论

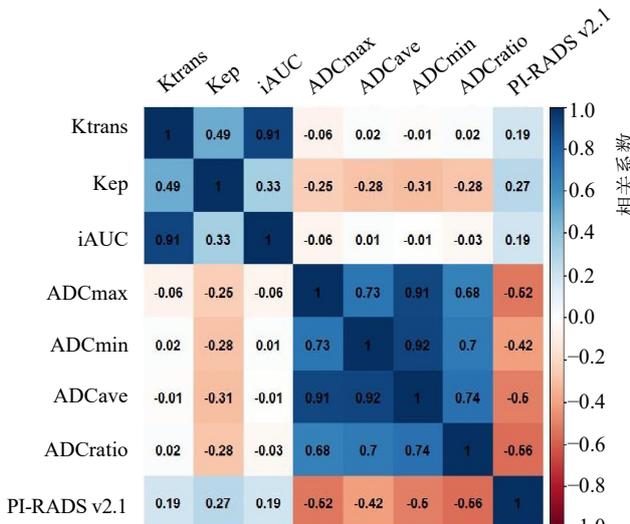
为避免不必要的穿刺活检,提高PSA灰区PCa的诊断准确性成为了目前临床亟待解决的一大难题。本研究结果表明,当PSA灰区时,DCE MRI与DWI的量化参数可以区分PCa与BPH,Ktrans、ADCave可作为影像学标志物与PI-RADS v2.1评分一起评估PCa。

DCE MRI被广泛用于监测血管通透性的变化<sup>[9]</sup>。从DCE MRI中可以提取4个参数:Ktrans、Kep、Ve及iAUC,其中Ktrans、Kep和Ve为定量参数,iAUC为半定量参数。这些参数可用于测量血管密度和血管内皮通透性。Ktrans代表对比剂的扩散速率,即单位时间内对比剂从血管内扩散到血管外的速度,

主要受血流灌注、对比剂经血管壁的转运过程及对比剂在细胞间隙中扩散过程的影响。Ve为对比剂相对于血管外细胞外总空间容积的体积,与组织细胞密度及细胞外间隙中对比剂浓度有关。Kep是Ktrans/Ve,可以反映血管密度与通透性。iAUC与肿瘤内流入的血量、肿瘤灌注以及肿瘤组织间隙有关,可以综合反映Ktrans、Kep和Ve的变化。研究表明,DCE MRI的Ktrans、Kep值高于BPH组<sup>[10-11]</sup>,这与本研究结果相符,提示PCa具有更高的血管密度与血管通透性。

DWI可计算得到ADC,并进一步提取ADC量化参数。DWI/ADC反映了组织中水分子的弥散运动。前列腺病变区正常含水的腺泡结构被不规则分布的病变组织取代,水分子弥散受限,ADC值降低,用于区分癌与非癌组织。有研究表明,前列腺癌ADC值与Gleason评分呈负相关<sup>[12]</sup>。本研究显示,DWI的ADCave值是区分PSA灰区PCa和BPH的独立因素。

本研究筛选出DCE MRI的Ktrans值、DWI的



注:PI-RADS v2.1 为前列腺影像报告与数据系统 v2.1,Ktrans 为转运常数,Kep 为速率常数,Ke 为血管外细胞外间隙体积百分数,iAUC 为初始强化曲线下面积,ADCmin 为病灶的最小 ADC,ADCmax 为病灶的最大 ADC,ADCave 为病灶的平均 ADC,ADCratio 为病灶 ADCave/邻近正常组织 ADCave 得到的 ADC 比值

图1 相关性热图

ADCave 值以及 PI-RADS v2.1 评分这 3 个 PCa 的独立预测因子,构建了诺模图预测模型,模型 AUC 值高达 0.981,显示具有较高的诊断效能,校准曲线显示模型的预测概率与实际概率一致性良好。DCA 显示模型在区分 PCa 与 BPH 方面具有很高的总体净获益,提示本研究构建的模型具有良好的临床应用潜能。

综上所述,DCE MRI 和 DWI 的量化参数结合 PI-RADS v2.1 评分的预测模型对 PSA 灰区 PCa 具有较高的诊断效能,有助于提高诊断准确性。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 谢清:研究设计、数据采集、数据整理、统计学分析、论文撰写、论文修改;姚伟根:研究设计、论文撰写、论文修改、研究指导;鲁鹏聪:数据采集;傅娇姣、刘洁、康聪、胡稳:数据整理、统计学分析

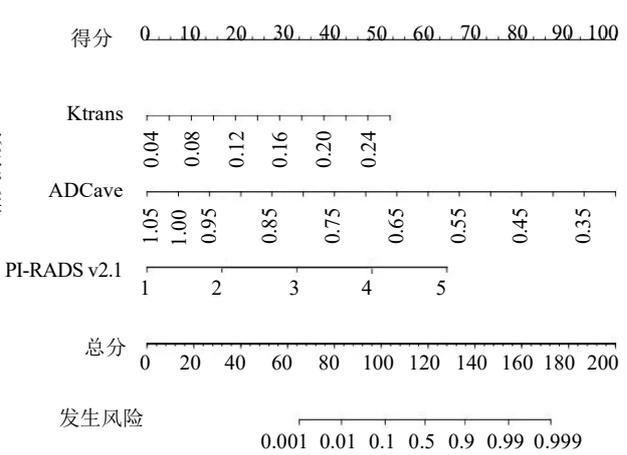
参 考 文 献

[1] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2024, 74(3): 229-263.

[2] SCHOLZ M C, STRUMS B. Re: Prostate specific antigen: A decade of discovery—what we have learned and where we are going[J]. J Urol, 2000, 163(4): 1259-1260.

[3] EIDE IA, ANGELSEN A. Prostataespesifikt antigen [J]. Tidsskr Nor Laegeforen,2000,120(21):2528-2531.

[4] 彭涛,熊燕,肖建明,等.前列腺癌 MRI 多参数诊断方法的盲法比较研究[J].华西医学,2016,31(1):88-93.



注:PI-RADS v2.1 为前列腺影像报告与数据系统 v2.1,Ktrans 为转运常数,ADCave 为病灶的平均 ADC

图2 基于 PI-RADS v2.1 评分、Ktrans、ADCave 预测 PCa 的诺模图模型

[5] TURKBEBY B, ROSENKRANTZ A B, HAIDER M A, et al. Prostate imaging reporting and data system version 2.1: 2019 update of prostate imaging reporting and data system version 2[J]. Eur Urol, 2019, 76(3): 340-351.

[6] GATTI M, FALETTI R, CALLERIS G, et al. Prostate cancer detection with biparametric magnetic resonance imaging (bpMRI) by readers with different experience: Performance and comparison with multiparametric (mpMRI)[J]. Abdom Radiol (NY), 2019, 44(5): 1883-1893.

[7] 王君鑫,赵文露,杨毅,等.动态增强 MRI 三维定量参数直方图诊断前列腺癌的价值[J].中华放射学杂志,2016,50(8):609-614.

[8] WEINREB J C, BARENTSZ J O, CHOYKE P L, et al. PI-RADS prostate imaging-reporting and data system: 2015, version 2[J]. Eur Urol, 2016, 69(1): 16-40.

[9] O'CONNOR J P, JACKSON A, PARKER G J M, et al. Dynamic contrast-enhanced MRI in clinical trials of antivasular therapies[J]. Nat Rev Clin Oncol, 2012, 9(3):167-177.

[10] MA X Z, LV K, SHENG J L, et al. Application evaluation of DCE-MRI combined with quantitative analysis of DWI for the diagnosis of prostate cancer[J]. Oncol Lett, 2019, 17(3): 3077-3084.

[11] WU X C, REINIKAINEN P, KAPANEN M, et al. Dynamic contrast-enhanced imaging as a prognostic tool in early diagnosis of prostate cancer: Correlation with PSA and clinical stage[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2018, 2018: 3181258.

[12] WOODFIELD C A, TUNG G A, GRAND D J, et al. Diffusion-weighted MRI of peripheral zone prostate cancer: Comparison of tumor apparent diffusion coefficient with gleason score and percentage of tumor on core biopsy[J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 194(4): W316-W322.

收稿日期:2024-06-30  
(本文编辑:钟美春)