

## 论 著

## ADC值联合R2 Water值在前列腺癌与前列腺增生鉴别诊断中的应用价值

王梦雅\* 杨宏楷 徐琦

马鞍山市人民医院影像科(安徽 马鞍山 243000)

**【摘要】目的** 探讨磁共振成像中ADC值联合HISTO序列的R2 Water值在鉴别前列腺癌(PCa)与前列腺增生(BPH)中的临床应用价值,为前列腺疾病的精准诊断及个体化治疗策略提供科学依据。**方法** 回顾性分析2023年9月至2024年8月马鞍山市人民医院前列腺癌患者40例和同期前列腺增生患者42例的临床及影像学资料。所有受试者均行3.0T多参数MRI扫描,包括DWI和HISTO序列,分别获得表观扩散系数(ADC值)及水弛豫率(R2 Water值)。通过独立样本t检验比较组间差异,采用ROC曲线分析各参数及其联合应用的诊断效能(敏感性、特异性和AUC)。**结果** PCa组R2 Water值明显高于BPH组,ADC值显著低于BPH组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。R2 Water值、ADC值诊断PCa的AUC分别为0.835和0.906,联合诊断AUC为0.960,敏感性为0.950,特异性为0.881,联合效能优于单一参数( $P < 0.05$ )。联合模型在校准、决策分析中表现最佳。**结论** ADC值联合R2 Water值在鉴别前列腺癌与前列腺增生中具有更高的灵敏度和特异性,可显著提升前列腺癌的影像学准确识别率,有望减少不必要的穿刺活检,为前列腺疾病的精准诊断与分级、疗效评估和个体化治疗提供重要支持。

**【关键词】** 前列腺癌; 前列腺增生; 磁共振成像; 弥散加权成像

**【中图分类号】** R737.25

**【文献标识码】** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.038

## The Value of ADC Combined with R2 Water in the Differential Diagnosis of Prostate Cancer and Benign Prostatic Hyperplasia

WANG Meng-ya\*, YANG Hong-kai, XU Qi.

Department of Imaging, Ma'anshan People's Hospital, Ma'anshan 243000, Anhui Province, China

## ABSTRACT

**Objective** To explore the clinical application value of ADC value in combination with R2 Water value from the HISTO sequence in magnetic resonance imaging for differentiating prostate cancer (PCa) from benign prostatic hyperplasia (BPH), and to provide a scientific basis for precise diagnosis and individualized treatment strategies for prostate diseases. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical and imaging data of 40 prostate cancer patients and 42 benign prostatic hyperplasia patients admitted to Ma'anshan People's Hospital from September 2023 to August 2024. All subjects underwent 3.0T multiparametric MRI scans, including DWI and HISTO sequences, to obtain apparent diffusion coefficient (ADC value) and water relaxation rate (R2 Water value), respectively. Independent samples t-tests were used to compare the differences between groups, and ROC curve analysis was used to analyze the diagnostic efficacy (sensitivity, specificity, and AUC) of each parameter and their combined application. **Results** The R2 Water value was significantly higher in the PCa group than in the BPH group, and the ADC value was significantly lower in the PCa group than in the BPH group, with statistically significant differences ( $P < 0.05$ ). The AUCs for R2 Water value and ADC value in diagnosing PCa were 0.835 and 0.906, respectively, and the AUC for combined diagnosis was 0.960, with a sensitivity of 0.950 and a specificity of 0.881. The combined efficacy was superior to that of single parameters (all  $P < 0.05$ ). The combined model performed best in calibration and decision curve analysis. **Conclusion** The combination of ADC value and R2 Water value has higher sensitivity and specificity in differentiating prostate cancer from benign prostatic hyperplasia, which can significantly improve the accuracy of imaging identification of prostate cancer, reduce unnecessary biopsies, and provide important support for precise diagnosis and grading, efficacy evaluation, and individualized treatment of prostate diseases.

**Keywords:** Prostate cancer; Benign prostatic hyperplasia; Magnetic resonance imaging; Diffusion-Weighted Imaging

前列腺癌(prostate cancer, PCa)和前列腺增生(benign prostatic hyperplasia, BPH)是男性最常见的两种泌尿系统疾病。前列腺癌发病率居全球男性癌症的第2位,同时也是男性癌症相关死亡率的第5位<sup>[1]</sup>。前列腺增生主要表现为前列腺肥大并伴随尿路症状。尽管两者在病理性质和预后上存在明显差异,但其早期的临床表现相似,导致其鉴别诊断存在难度<sup>[2]</sup>。现阶段,前列腺癌的临床诊断金标准为经直肠超声引导下的前列腺穿刺活检,但这是一种侵入性操作,患者耐受性较差,仅作为确诊手段,而依赖血清肿瘤标志物(如PSA、fPSA、CEA)和影像学的非侵入性检测在疾病筛查和治疗评估中显得尤为重要<sup>[3]</sup>。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)因其出色的软组织对比和无放射性被广泛用于前列腺疾病的影像学评估,其中弥散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)通过表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)反映组织的水分子弥散特性,为前列腺癌与增生性病变的鉴别提供了重要的参数支持<sup>[4]</sup>。然而,仅依赖单一的MRI序列可能无法全面反映病变的复杂性和分子特征,因此进一步优化MRI技术并结合其他功能参数显得尤为关键。

高速T2校正多回波磁共振波谱(high-speed T2-corrected multiecho magnetic resonance spectroscopic, HISTO MRS)序列通过量化组织中水分子的弛豫特性,能够间接反映组织成分的微观环境,包括铁含量的变化特征<sup>[5]</sup>。研究表明,前列腺癌的肿瘤组织中代谢异常表现为组织内铁离子浓度升高,这可能加速肿瘤生长并促进恶性进展<sup>[6]</sup>。HISTO序列生成的R2 Water值(即水弛豫率)不仅体现了前列腺局部组织的铁代谢水平,还可能为前列腺癌的分期和诊疗决策提供参考依据。ADC值与水分子弛豫率参数的联合应用为前列腺良恶性病变的鉴别提供了新的技术路径。相关研究已证实,采用多参数成像技术进行联合分析,能够显著提高前列腺癌的诊断敏感度和特异性,同时为疾病分期和预后评估提供更多信息<sup>[7]</sup>。因此,本研究将探讨磁共振成像中的ADC值联合HISTO序列的R2 Water值在鉴别前列腺癌与前列腺增生中的临床应用价值。

## 1 资料与方法

## 1.1 一般资料 回顾性选取2023年9月至2024年8月前列腺病变患者82例。

纳入标准:(1)检查前未经前列腺穿刺或手术史;(2)均有病理诊断结果;(3)均征求患者意见并签署知情同意书。排除标准:(1)其他重要脏器严重功能障碍者;(2)病史不完整或有重要干扰变量;(3)存在显著的铁代谢相关疾病或长期使用影响铁代谢药物。所有患者均为男性,年龄58~87岁,平均年龄(72.317±6.838)岁。研究获得伦理委员会批

**【第一作者】** 王梦雅,女,主管技师,主要研究方向:医学影像技术。E-mail:wmy890618@sina.com

**【通讯作者】** 王梦雅

准开展。

**1.2 方法** 采用3.0T磁共振设备(Siemens Prisma, 德国), 18通道腹部相控阵线圈。DWI序列TR: 3500ms, TE: 74ms, 体素大小 $0.9\text{mm} \times 0.9\text{mm} \times 3\text{mm}$ , b值: 0, 500, 1000, 2000s/mm<sup>2</sup>。HISTO序列定位参考T2WI图像, 将体素置于病变实质区域, TR: 3000ms, TE1:12ms, TE2:24ms, TE3:36ms, TE4:48ms, TE5:72ms, 体素大小 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。

**1.3 数据分析** 扫描图像经工作站自动后处理得出ADC图及R2 Water值彩图, ADC值的测量根据HISTO序列体素定位位置, 同步选取病灶实质部分, 手动测绘感兴趣区(region of interest, ROI), ROI采取多次测量, 取测量结果的最小值。

**1.4 统计学处理** 统计学分析采用Python 3.8.2。正态分布数据采

用均值±标准差, 行独立样本t检验; 非正态分布数据用中位数(四分位间距), 行Kruskal-Wallis检验。Levene检验评估方差的同质性。统计学显著性水平为 $P < 0.05$ 。模型性能通过ROC曲线及AUC评估, DeLong检验比较AUC差异。DCA用于评价模型临床应用价值。模型校准采用校准曲线及Hosmer-Lemeshow检验(以 $P > 0.05$ 为校准良好标准)。

## 2 结果

**2.1 基线特征** 82例患者经病理诊断, 其中40例前列腺癌, 42例前列腺增生。前列腺癌组患者的R2 water值大于前列腺增生组, 前列腺癌组患者的ADC值低于前列腺增生组, 差异有统计学意义( $P < 0.05$ )见表1, 图(1, 2)。

表1 基线统计

特征	总计	前列腺增生	前列腺癌	t值	P值
年龄, mean (SD)	72.317 (6.838)	71.381 (7.095)	73.300 (6.501)	-1.279	0.205
R2 water, mean (SD)	14.810 (2.800)	13.293 (2.323)	16.402 (2.352)	-6.022	<0.001
ADC, mean (SD)	0.749 (0.197)	0.878 (0.172)	0.613 (0.113)	8.260	<0.001
ADC, median [Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> ]	0.716 [0.592, 0.873]	0.872 [0.768, 0.962]	0.602 [0.540, 0.667]	39.971	<0.001

**2.2 R2 water值、ADC值诊断前列腺癌的价值** R2 water值诊断前列腺癌的AUC为0.835(95%CI: [0.722, 0.929]), 敏感性为0.825, 特异性为0.881。ADC值诊断前列腺癌的AUC为0.906(95%CI: [0.833, 0.956]), 敏感性0.925, 特异性为0.833。R2 water值与ADC值联合诊断AUC为0.960(95%CI: [0.908, 0.990]), 敏感性为0.950, 特异性为0.881。

对比上述结果, R2 water值与ADC值联合诊断效能最优(表2)。校准曲线表明, R2 water值与ADC值联合预测结果与实际结果一致性最好(图3A), Hosmer-Lemeshow 检验p值均大于0.05(表3)。对比DCA曲线分析表明, R2 water值与ADC值联合诊断模型大部分阈值概率下患者净收益均大于其他模型(图3C)。R2 water值、ADC值、R2 water值与ADC值联合模型之间AUC之间差异有统计学意义(图3B, 表4)。

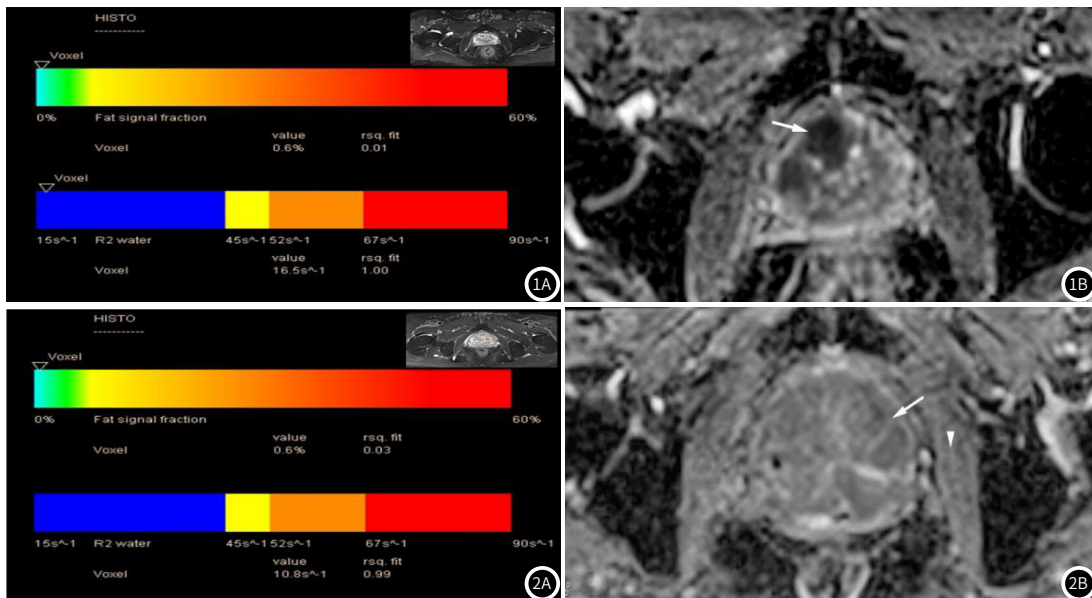


图1A~1B 男性, 76岁, 前列腺癌(箭)。图1A HISTO序列伪彩图, R2 water值为16.5HZ; 图1B ADC值约 $0.559 \times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$ 。

图2A~2B 男性, 87岁, 前列腺增生(箭)。图2A HISTO序列伪彩图, R2 water值为10.8HZ; 图2B ADC值约 $1.063 \times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$ 。

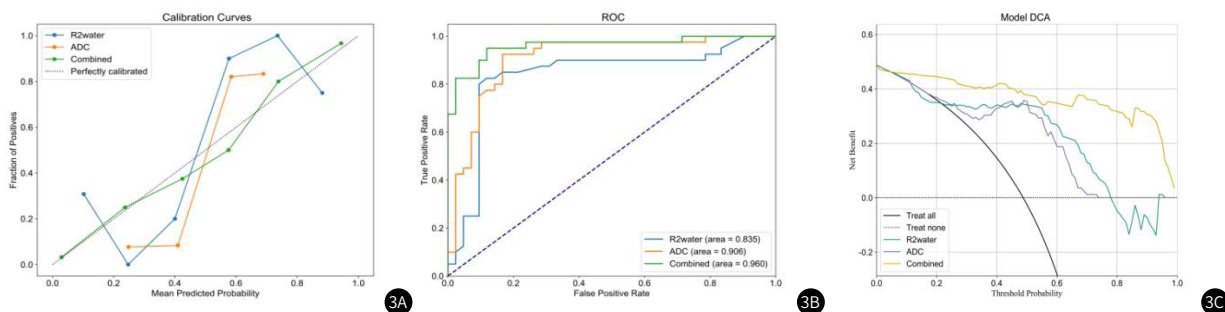


图3 R2 water值和ADC值单独诊断和联合诊断效能比较。图3A 校准曲线, 图3B ROC曲线, 图3C DCA曲线。

表2 诊断效能对比

Model	ACC	AUC	Sensitivity	Specificity	NPV	PPV	F1
R2 water	0.854	0.835	0.825	0.881	0.841	0.868	0.846
ADC	0.878	0.906	0.925	0.833	0.921	0.841	0.881
Combined	0.915	0.960	0.950	0.881	0.949	0.884	0.916

表3 Hosmer-Lemeshow 检验

Model	$\chi^2$	P值
R2 water	0.542	0.462
ADC	17.902	0.201
Combined	1.779	0.182

表4 Delong 检验

Model	z值	P值
R2 water vs ADC	1.075	0.282
R2 water vs Combined	2.383	0.017
ADC vs Combined	2.300	0.021

### 3 讨论

基于3.0T磁共振设备采集的ADC和R2 water参数,无论单独使用还是联合分析,在前列腺癌与前列腺增生的鉴别中均表现出较高的敏感性和特异性。具体而言,ADC值在前列腺癌组织显著低于前列腺增生,R2 water值则在前列腺癌组织显著高于前列腺增生(均 $P < 0.001$ )。ROC曲线分析,ADC值、R2 water值单独诊断前列腺癌的特异性分别为0.906和0.835,而联合模型AUC达0.960,敏感性和特异性分别达0.950和0.881,优于单独指标。

ADC(表观扩散系数)反映组织内水分子弥散受限程度,与细胞密度密切相关。肿瘤组织通常具有高细胞密度和破坏性结构,限制了水分子的运动,导致ADC值显著降低。大量文献均支持ADC值作为肿瘤良恶性鉴别及分级的重要参数<sup>[8-10]</sup>。本研究显示前列腺癌组ADC值低于增生组,与既往报道一致,提示ADC可作为鉴别前列腺恶性病变的有效影像学指标。

R2 water(水弛豫率)则间接反映组织铁含量变化,是HISTO序列的特有参数。肿瘤细胞代谢活跃,铁代谢紊乱,常表现为铁离子堆积。这种铁过载状态促进活性氧生成,驱动肿瘤进展<sup>[11-12]</sup>。R2 water值升高代表组织铁离子水平上升,本研究数据进一步证实前列腺癌患者R2 water值高于良性增生,为前列腺癌影像组学提供分子层面依据。更为重要的是,联合ADC与R2 water分析可从不同生物学机制体现肿瘤微环境变化<sup>[13-14]</sup>。一方面,ADC体现细胞密度及组织结构改变;另一方面,R2 water为代谢异常、铁离子积聚的影像反映。两者互补显著提升了诊断准确性(联合AUC=0.960),为临床早期判断及个体化治疗决策提供了有力支持。

采用HISTO序列高精度量化R2 water,进一步提升了诊断性能。且据ROC及Delong检验,两项参数联合的诊断优势明显高于任一项( $P$ 均 $< 0.05$ )。与以往将T2WI+DWI为主的多模态影像学相比<sup>[15-17]</sup>,本研究不仅采用了分子代谢信息,且优化了参数采集和读片流程,提高了一致性和可重复性。这些创新点为多参数MRI的临床诊断提供了循证依据。应用ADC与R2 water联合模型,可在较高敏感性、特异性的前提下区分前列腺癌与良性增生,有望减少不必要的活检次数,提升高危患者的早期识别率。同时,R2 water反映的组织铁代谢改变为前列腺癌分期、分级及治疗效果监控提供了基础,为后续药物铁代谢靶向治疗等新策略提供了影像学基础。

尽管本研究取得了一定价值的结果,但仍存在一些局限。首先,样本量有限,且为单中心回顾性研究,存在选择偏倚。其次,病变的异质性和MRI参数的标准化仍待进一步完善,受操作者依赖性较大。再次,部分高危或多灶型前列腺癌可与慢性前列腺炎、炎性增生结构重叠,导致影像诊断出现假阳性/阴性。此外,目前HISTO序列及R2 water参数的普及率尚不高,不同厂商MRI平台间协议存在差异,推广需跨中心验证。

综上所述,ADC值联合R2 water值应用于前列腺癌与前列腺

增生鉴别中极具临床价值,结果显示联合模型优于单独指标,诊断效能显著,多参数成像为前列腺疾病提供了更为精确的影像学分型依据,为个体化诊疗提供了重要帮助。

### 参考文献

- [1] Bergengren O, Pekala KR, Matsoukas K, et al. 2022 update on prostate cancer epidemiology and risk factors—a systematic review [J]. *Eur Urol*, 2023, 84(2): 191–206.
- [2] 陈焰庭, 邹玉坚, 袁灼彬, 等. 体素内不相干运动联合表观扩散系数对前列腺癌诊断价值的研究[J]. *磁共振成像*, 2024, 15(7): 118–123, 142.
- [3] Chen D, Ma Y, Yang A, et al. Dual-Enhanced SERS satellite immunonano-complex for multiple PSA-Mediated PHI assay toward clinical prostate cancer screening[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(5): 2411747.
- [4] 王明皓, 崔文, 刘园园, 等. 前列腺癌患者病灶ADC值及DCE-MRI成像参数与病理Gleason评分相关性分析[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2021, 19(11): 157–159.
- [5] 郑欢露, 李白艳, 陈鹰, 等. HISTO及DWI序列在脊柱结核中的定量研究[J]. *磁共振成像*, 2019, 10(5): 356–360.
- [6] Dhillon V S, Deo P, Fenech M. Effect of iron and calcium on radiation sensitivity in prostate cancer patients relative to controls[J]. *Mutagenesis*, 2023, 38(6): 305–314.
- [7] Xu Y, Wang R, Fang Z, et al. Feasibility study of AI-assisted multiparameter MRI diagnosis of prostate cancer[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 10530.
- [8] Meyer H J, Wienke A, Surov A. Discrimination between malignant and benign thyroid tumors by diffusion-weighted imaging—A systematic review and meta analysis[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2021, 84: 41–57.
- [9] Nalaini F, Shahbazi F, Mousavinezhad S M, et al. Diagnostic accuracy of apparent diffusion coefficient (ADC) value in differentiating malignant from benign solid liver lesions: a systematic review and meta-analysis[J]. *The British Journal of Radiology*, 2021, 94(1123): 20210059.
- [10] Vijithananda S, Jayatilake M, Goncalves T, et al. Discriminating malignant and benign brain tumors using texture features of MRI-ADC images[J]. *Multidisciplinary Cancer Investigation*, 2023, 7(1): 17–26.
- [11] Simchick G, Zhao R, Hamilton G, et al. Spectroscopy-based multiparametric quantification in subjects with liver iron overload at 1.5 T and 3T[J]. *Magnetic resonance in medicine*, 2022, 87(2): 597–613.
- [12] Kimita W, Ko J, Petrov M S. Relationship of iron intake, ferritin, and hepcidin with the transverse relaxation rate of water protons in the pancreas[J]. *Nutrients*, 2023, 15(17): 3727.
- [13] Wang J, Hu S, Liang P, et al. R2\* mapping and reduced field-of-view diffusion-weighted imaging for preoperative assessment of nonenlarged lymph node metastasis in rectal cancer[J]. *NMR in Biomedicine*, 2024, 37(10): e5174.
- [14] Wang D, Lu Y, Li X, et al. Evaluation of HIF-1 $\alpha$  expression in a rat glioma model using intravoxel incoherent motion and R2\* mapping[J]. *Frontiers in Oncology*, 2022, 12: 902612.
- [15] 郭吉锋, 纪志英, 解丙坤, 等. T2WI联合DWI及DCE对外周带慢性前列腺炎与前列腺癌的诊断效能分析[J]. *磁共振成像*, 2020, 11(12): 1182–1185.
- [16] 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.
- [17] 刘华娟. 磁共振DWI结合T2WI对前列腺疾病的临床诊断价值分析[J]. *影响研究与医学应用*, 2022, 6(4): 61–63.

(收稿日期: 2025-08-03)

(校对编辑: 赵望淇)