·临床研究·

MRI 多参数成像在甲状腺良恶性结节鉴别中的应用研究

冯进[1] 缪锦林[1] 朱骏[1] 胡凯[1] 夏建国[2*]

（1.江苏省泰州市第四人民医院放射科，泰州 225300；2.南京医科大学附属泰州市人民医院放射科，泰州 225300）

【摘要】 目的 探讨MRI平扫、常规增强及动态对比增强扫描的单一参数以及多参数成像技术在甲状腺良恶性结节鉴别中的应用价值。**方法** 回顾性分析2022年4月至2023年12月泰州市第四人民医院经手术病理证实并行术前甲状腺MRI检查的74例甲状腺病变患者的共89枚结节，观察结节边界、结节是否伴有囊变，测量、记录结节大小、表观扩散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）值及MRI动态对比增强各定量参数，包括转运常数（K^{trans}）值、血管外细胞外间隙容积分数（V_e）值、血管回流常数（K_{ep}）值、受试者工作特征初始曲线，下面积（iAUC）值。采用独立样本*t*检验及Mann–Whitney *U* 检验比较甲状腺良恶性结节各项参数。采用多因素Logistic回归筛选独立预测因素并建立联合诊断模型，绘制受试者工作特征（receiver operating characteristic, ROC）曲线，分析各参数及联合模型性能。**结果** 良恶性甲状腺结节的边界、ADC值、K^{trans}值、iAUC值的差异具有统计学意义（$P<0.05$）。运用多因素Logistic回归分析对所有的参数进行筛选，最终结果显示iAUC值（$OR=0.890$）、ADC值（$OR=0.984$）、边界（$OR=64.759$）是鉴别甲状腺结节良恶性的独立预测因子，其ROC曲线下面积（area under curve, AUC）分别为0.807、0.917、0.836，三者联合诊断模型的AUC为0.986，敏感度为94.1%，特异度为89.4%。内部验证显示该模型具有良好的泛化能力（验证集AUC=0.979）。**结论** 甲状腺MRI多参数成像可以提高甲状腺良恶性结节鉴别的能力，联合独立预测因子iAUC值、ADC值及边界的诊断模型具有较高的诊断性能。

【关键词】 甲状腺结节；良恶性鉴别；多参数；磁共振成像；动态对比增强

【中图分类号】 R581 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202601011

Application of multi–parameter MRI in differential diagnosis of benign and malignant thyroid nodules

Feng Jin[1], Miao Jinlin[1], Zhu Jun[1], Hu Kai[1], Xia Jianguo[2]*

(1. Department of Radiology, Taizhou Fourth People's Hospital, Taizhou 225300, China;
2. Department of Radiology, the Affiliated Taizhou People's Hospital of Nanjing Medical University, Taizhou 225300, China)

【Abstract】 Objective To explore the application value of multiparametric MRI techniques, including conventional MRI, contrast–enhanced MRI (CE–MRI), and dynamic contrast–enhanced MRI (DCE–MRI), in differentiating benign from malignant thyroid nodules. **Methods** A retrospective analysis was performed on 74 patients with 89 thyroid lesions who were confirmed by surgical pathology with definite pathological results and preoperative magnetic resonance imaging. Observe the nodule boundary and whether the nodule has become cystic. Nodule size, apparent diffusion coefficient (ADC), and various quantitative parameters including volume transfer constant(K^{trans}), extracellular space volume fraction outside blood vessels (V_e), vascular return constant(K_{ep}), initial area under the gadolinium–concentration–time curve (iAUC) from DCE–MRI were measured, and recorded. Independent sample *t*–tests and Mann–Whitney *U* tests were used to compare parameters between benign and malignant thyroid nodules. Multifactorial logistic regression was employed to select independent predictive factors and establish a combined diagnostic model, with ROC curves analyzed to assess the performance of individual parameters and the combined model. **Results** Differences

第一作者：冯进，男，硕士研究生，主治医师，研究方向：磁共振成像

通信作者：夏建国，男，硕士研究生，主任医师，研究方向：磁共振成像

in lesion margin, ADC, K^{trans}, and iAUC between benign and malignant thyroid nodules were all statistically significant (P<0.05). Multivariate logistic regression with stepwise selection identified iAUC, ADC, and margin status as the optimal predictor set; the corresponding odds ratios were 0.890, 0.984, and 64.759, respectively. The area under the ROC curve for this model was 0.986, with a sensitivity of 94.1%,and a specificity of 89.4%. Internal validation demonstrated excellent generalizability, with an AUC of 0.979 in the validation cohort. **Conclusion** This study shows that multiparametric MRI can improve the ability to distinguish between benign and malignant thyroid nodules. A combined diagnostic model incorporating independent risk factors such as iAUC value, ADC value, and boundary clarity has a high diagnostic value.

【Key words】 Thyroid nodules; Benign and malignant discrimination; Multiparametric; Magnetic resonance imaging; Dynamic contrast–enhanced

甲状腺癌在全球不同人群中的发病率呈现出不断上升趋势[1]。高分辨率超声检查发现成人中约有 60%存在至少 1个甲状腺结节，但其中仅约 5% ~ 15%经细针穿刺或术后病理证实为恶性[2]。无论良性还是恶性结节，其检出率均为女性高于男性[3]。绝大多数甲状腺结节为良性，最常见的是结节性甲状腺肿，可表现为单发或多发结节。在恶性结节中，组织学类型以甲状腺乳头状癌最为常见，约占 85%；其次为甲状腺滤泡状癌，约占 12%，甲状腺髓样癌和未分化癌较为罕见，占比分别约为 2%和 1%[4–5]。

甲状腺超声检查是临床上最常用的检查方法之一，可以记录甲状腺的大小、单个结节的位置和特征，还可以检测到体格检查中未发现的结节。恶性结节的典型影像学特征呈现出以实性成分为主的实质结构，回声低或极低，边缘呈不规则形状，有微小钙化，并且没有明显的血管包绕[6–7]。但超声影像学检查本身也具有局限性，如超声空间分辨率低、受超声科诊断医师的诊断水平影响等。

颈部 CT检查可以显示病变及病变周围组织的受累情况，但大多数 CT成像上甲状腺结节没有可靠的恶性肿瘤征象[8–9]。相对于 CT平扫及增强检查，磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）在甲状腺结节鉴别诊断中的研究已逐渐从形态学评估深入至功能定量分析领域。动态对比增强磁共振成像（dynamic contrast–enhanced MRI, DCE–MRI）通过精确量化结节内部的血流动力学参数，能够无创评估病灶的微血管生成与血流灌注状态，从而为良恶性鉴别提供客观依据。然而，当前多数研究仍局限于对单一灌注参数的独立分析，未能实现 DCE–MRI的血流动力学参数与多序列磁共振影像学特征的系统整合，一定程度上限制了临床诊断准确性的提升[10]。本研究旨在构建并验证一个融合 DCE–MRI血流动力学参数与多序列磁共振影像学特征的综合性诊断模型，以期突破单一参数诊断的局限性，为实现甲状腺结节精准鉴别提供新的量化依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性收集 2022年 4月至 2023年 12月就诊于泰州市第四人民医院经超声检查发现患有甲状腺结节的患者，并且取得病理证实以及行甲状腺 MRI检查。收集患者的年龄、病理结果等临床资料及 MRI检查影像资料。纳入标准：①手术前行甲状腺 MRI检查；②病理结果明确；③ MRI检查图像完整，需包含 DWI序列及增强（常规增强和动态对比增强）序列。排除标准：①患者 MRI检查前接受过治疗，如手术、内分泌治疗等；② MRI图像质量较差，影响观察及测量；③甲状腺结节直径［（长径＋短径）/2］<5 mm；④特殊病理类型，如甲状旁腺腺瘤等。

根据上述纳入和排除标准，本研究排除了 6例患者，其中 5例原因是其 MRI检查存在严重的伪影，影响了诊断和测量的准确性，另外 1例是因为病理诊断结果显示其为甲状旁腺腺瘤。最终共 74例患者纳入研究，男性 21例，女性 53例，年龄 23 ~ 78岁，平均（55.47 ± 13.06）岁。经术后病理证实恶性结节 31例 38枚，病理 1例为髓样癌，其余均为乳头状癌；良性结节 43例 51枚，其中结节性甲状腺肿 39

枚、桥本氏甲状腺炎5枚、腺瘤7枚。以手术后病理为依据，将病灶分为良性组及恶性组。将所有患者按7∶3的比例随机划分为训练集与验证集，其中，训练集47例，共62枚结节；验证集27例，共27枚结节。本研究经泰州市第四人民医院医学伦理委员会批准（2023-EC/TZFH-0030）。

1.2 检查方法

采用德国西门子Siemens Skyra 3.0T超导型磁共振扫描仪，检查线圈为专用头颈部联合一体化线圈以及能够完全覆盖于颈部的柔表面线圈。患者在进行MRI扫描时采用仰卧位，头部朝向磁共振扫描仪入口，以确保甲状腺区域充分暴露。为了减少呼吸、吞咽或咳嗽对成像质量的影响，医务人员会指导患者在扫描过程中保持平稳的呼吸，并尽可能避免不必要的身体移动。

MRI成像的常规定位范围设定为从下颌角延伸至主动脉弓的上缘，以全面覆盖甲状腺及其周围结构。初步定位后，依次进行以下序列的成像：冠状位T_2WI、矢状位T_1WI及横断位T_2WI均采用自旋回波水脂分离技术（turbo spin echo-Dixon, TSE-Dixon），FOV为240 mm×240 mm，TR 3 730 ms，TE 84 ms，层厚为3.0 mm，层间距为0.3 mm。横断位T_1WI采用快速自旋回波序列（fast spin echo, FSE），FOV、层厚及层间距同横断位T_2WI序列，TR 450 ms，TE 9.4 ms。

DWI采用基于分段读出平面回波（readout segmentation of long variable echo-trains，RESOLVE）技术，b值设定为0、800 s/mm^2，FOV为240 mm×240 mm，TR为4 600 ms，TE为59 ms，层厚为3.0 mm，层间距为0.9 mm。

DCE-MRI采用容积内插法体部检查（volume interpolated body examination, VIBE）序列，同样设定FOV为240 mm×240 mm，TR为4 060 ms，TE为59 ms，层厚4.0 mm、层间距 0 mm。在动态对比增强扫描的第3阶段，通过高压注射器快速静脉注射对比剂欧乃影（Gadolinium-DTPA，Gd-DTPA，GE公司，爱尔兰），剂量为0.1 mmol/kg，注射速率为2～3 mL/s，随后以相同速率注入生理盐水20 mL以清洗。之后进行33期的无间歇扫描，以捕捉对比剂在甲状腺结节及周围组织中的动态分布和渗透情况。

动态对比增强扫描完成后，进行常规增强扫描（contrast-enhanced MRI, CE-MRI）。采用TSE-Dixon序列行冠状位、矢状位及横断位T_1加权成像扫描，TR为450 ms，TE为9.2 ms，FOV、层厚和层间距同MRI平扫序列。

1.3 成像分析

每一序列结束后，图像将传输到Siemens后处理工作站，由2名具有10年以上头颈影像诊断经验、具备副主任医师及以上职称的医师独立阅片，意见不统一时讨论达成一致。首先阅读MR平扫序列，观察结节直径、边界、信号特点。每一个结节都视为独立的观察对象，分别在冠状位、矢状位、横断位图像上找出结节最大的单个层面并测量结节的最长径。边界以分叶、形态、瘤周包膜连续性分为清楚及不清楚。依据结节伴不伴有囊变，分为有囊变及无囊变两组。

测量表观扩散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）值前先结合常规平扫T_1WI、T_2WI及CE-MRI图像，尽量避免囊变、坏死及出血区域。在Siemens后处理工作站使用Tissue 4D软件包载入35期动态增强图像及组织参考T_1值，勾画感兴趣区域（region of interest, ROI），尽可能多地包含病变，避免囊变、坏死及出血区域，进一步绘制感兴趣体积（volume of interest, VOI），该VOI涵盖整个甲状腺区域，以便在药物动力学分析中仅将计算限定于指定的VOI内。记录包括转运常数（K^{trans}）、血管外细胞外间隙容积分数（V_e）、血管回流常数（K_{ep}）以及受试者工作特征初始曲线下面积（iAUC）在内的各项定量参数。

1.4 统计学方法

采用IBM SPSS Statistics 23.0进行统计学分析。利用卡方检验定性分析以结节为观察单位的病灶边缘是否清楚以及是否伴有囊变。以单个结节为独立观察单位，运用Kolmogorov-Smirnov检验对计量资料进行正态性检验，符合正态分布的用$\bar{x}\pm s$表示，组间比较采用独立样本t检验；不符合正态分布的用M（Q_1，Q_3）表示，组间比较采用Mann-Whitney U检验。将单因素分析中有统计学意义的变量纳入多因素Logistic回归分析并建立联合诊断模型。通

过受试者工作特征（receiver operating characteristic, ROC）曲线的曲线下面积（area under curve, AUC）分析评估诊断效能，将最终模型应用于内部验证集，评估其泛化能力。以P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 甲状腺良恶性结节大小、边界、囊变情况和ADC值

甲状腺良性结节大小为（18.2 ± 12.4）mm（范围5.0 ~ 57.0 mm），恶性结节大小为（6.9 ± 4.4）mm（范围5.0 ~ 21.5 mm），差异有统计学意义（t =4.652，P <0.001）。甲状腺良性结节边界清楚为48枚，不清楚为3枚；恶性结节边界清楚为2枚，不清楚为36枚，差异有统计学意义（χ^2=69.562，P <0.001）。甲状腺良性结节伴有囊变为34枚，未伴有囊变为17枚；恶性结节伴有囊变为6枚，未伴有囊变为32枚，差异有统计学意义（χ^2=22.778，P <0.001）。甲状腺良性结节的ADC值为（1.296 ± 0.187）× 10^{-3} mm^2/s，恶性结节的ADC值为（0.990 ± 0.101）× 10^{-3} mm^2/s，差异有统计学意义（t=7.891，P<0.001）。

2.2 DCE–MRI单一定量参数分析

甲状腺恶性结节的K^{trans}值、iAUC值小于良性结节，且差异具有统计学意义（P<0.001）。良性结节的V_e值及K_{ep}值均大于恶性结节，但差异没有统计学意义。见表1。

表1 良恶性甲状腺结节DCE–MRI定量参数结果比较（$\bar{x} \pm s$）

参数	良性结节（n=51）	恶性结节（n=38）	t值	P值
K^{trans}（min^{-1}）	0.626 ± 0.288	0.436 ± 0.197	3.624	<0.001
V_e	0.384 ± 0.107	0.341 ± 0.205	1.205	0.076
K_{ep}（min^{-1}）	1.455 ± 0.863	1.203 ± 1.029	1.225	0.080
iAUC（mm^2/s）	45.358 ± 12.342	31.929 ± 9.935	5.551	<0.001

注：DCE–MRI为动态对比增强磁共振成像；K^{trans}为转运常数；V_e为血管外细胞外间隙容积分数；K_{ep}为血管回流常数；iAUC为受试者工作特征初始曲线下面积。

2.3 联合应用多参数鉴别甲状腺结节的良恶性

2.3.1 多因素Logistic回归模型构建

将单因素分析中具有统计学意义的参数纳入多因素Logistic回归分析，结果显示iAUC值（OR=0.890）、ADC值（OR=0.984）、边界（OR=64.759）是鉴别甲状腺结节良恶性的独立预测因子，见表2，并构建联合诊断模型如下：

$$Logit(P)=\beta_0-0.117\times X_{iAUC}-0.016\times X_{ADC}+4.171\times X_{border} \quad (1)$$

其中，X_{iAUC}为iAUC值，X_{ADC}为ADC值，两者均为实测值；X_{border}为结节边界，赋值：清楚=0，不清楚=1；β_0为模型截距（常数项）。

表2 鉴别甲状腺结节良恶性的独立预测因子

参数	β	SE	Wald χ^2值	P值	OR值	95%CI
iAUC	–0.117	0.049	5.747	0.017	0.890	0.808 ~ 0.979
ADC	–0.016	0.004	14.099	0.001	0.984	0.976 ~ 0.993
边界	4.171	1.253	11.072	0.001	64.759	5.551 ~ 755.445

注：iAUC为受试者工作特征初始曲线下面积；ADC为表观扩散系数。

2.3.2 诊断效能评估

各单一参数与联合诊断模型的诊断效能见表3及图1。ROC曲线结果显示，iAUC、ADC、边界诊断甲状腺良恶性结节的AUC为0.807、0.917、0.836。联合诊断模型的截断值为0.351，AUC为0.986，AUC的95%CI为0.967 ~ 1.000，在此阈值下敏感度为94.1%，特异度为89.4%，阳性预测值、阴性预测值分别为92.3%、91.8%，准确度为92.1%。

表3 单一参数与联合诊断模型鉴别甲状腺结节良恶性的诊断效能评估

指标	截断值	AUC（95%CI）	敏感度（%）	特异度（%）	阳性预测值（%）	阴性预测值（%）	准确度（%）
iAUC（mm^2/s）	37.3	0.807（0.715 ~ 0.899）	82.4	76.3	82.4	76.3	79.8
ADC（× 10^{-3} mm^2/s）	1.1	0.917（0.863 ~ 0.971）	82.4	86.8	89.4	78.6	84.3
边界	0.5	0.836（0.750 ~ 0.923）	72.5	94.7	94.8	72.5	82.0
联合诊断模型	0.351	0.986（0.967 ~ 1.000）	94.1	89.4	92.3	91.8	92.1

注：iAUC为受试者工作特征初始曲线下面积；ADC为表观扩散系数；AUC为受试者工作特征曲线下面积。

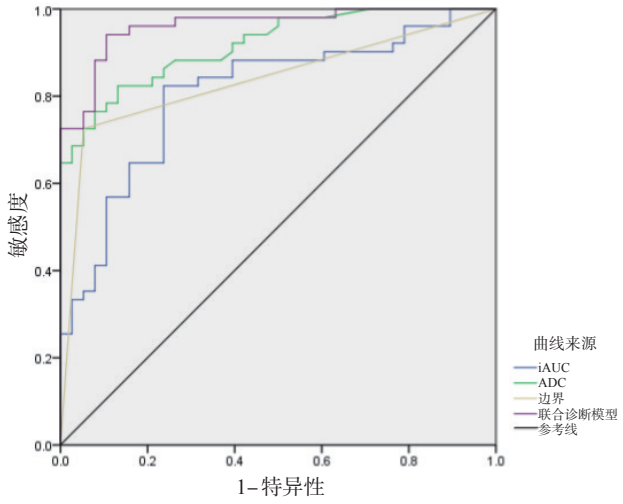


图1 单一参数与联合诊断模型鉴别甲状腺结节良恶性的ROC曲线

2.4 诊断模型的训练与内部验证

为评估模型的泛化能力，将上述模型应用于未参与建模的内部验证集（27枚结节）。结果显示，模型在验证集中的ROC曲线下面积（area under the curve，AUC）为 0.979（95%*CI*=0.941 ~ 1.000）。在最佳截断值下，其敏感度为91.7%，特异度为93.3%，准确度为92.6%。训练集与验证集性能高度一致，表明该联合诊断模型具有良好的内部有效性与稳定性。

2.5 典型病例

本研究选取2例典型病例对比分析良恶性甲状腺结节的MRI图像差异。病例一：55岁女性患者，病理确诊为良性甲状腺腺瘤（图2）；病例二：48岁男性患者，病理确诊为甲状腺乳头状癌（图3）。通过对比分析可见，与边界清晰、包膜完整的良性结节相比，恶性结节在T_2WI上表现为边界模糊、形态不规则及信号强度异质性增高（图3A）；在DWI序列上呈明显高信号，提示水分子扩散受限（图3C）；DCE–MRI定量参数亦显示，恶性结节的K^{trans}值及iAUC值均低于良性结节。

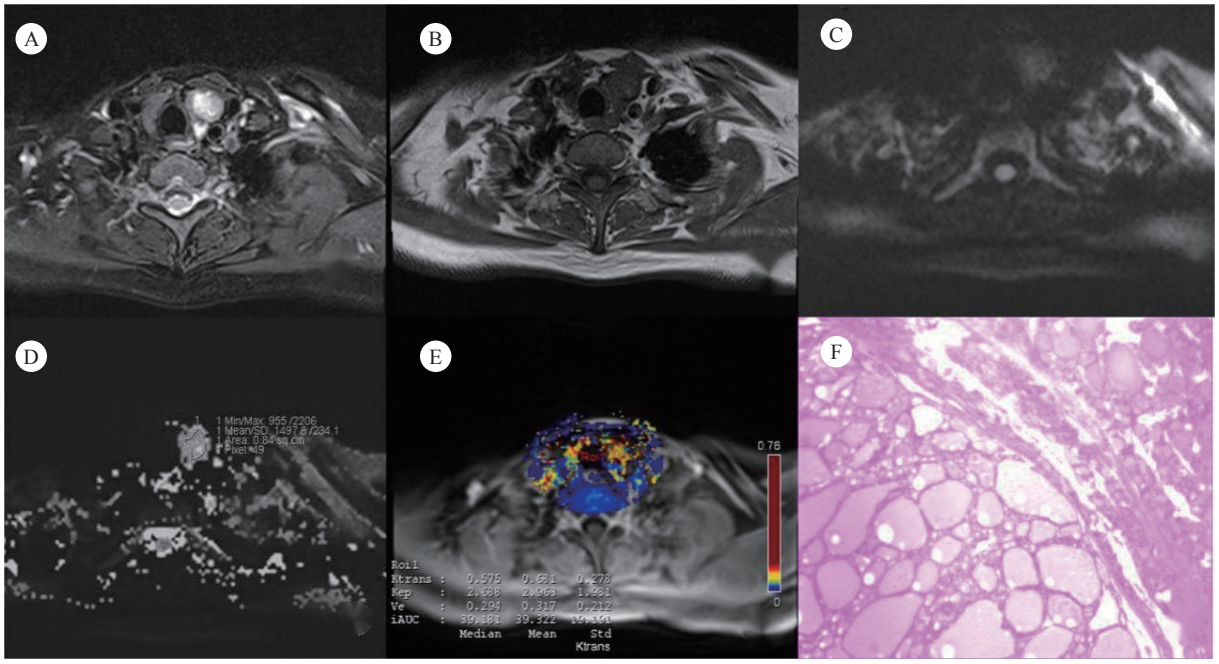


图2 良性甲状腺腺瘤的MRI图像 A为在T_2WI序列上，甲状腺左叶可见类圆形高低混合信号影；B为在T_1WI序列上，结节呈不均匀低信号，边界清楚，可见完整的低信号包膜；C为DWI图，病灶为低信号，未见明显扩散受限；D为ADC图，ADC值为1.497×10^{-3} mm^2/s；E为K^{trans}图，K^{trans}值为0.681 min^{-1}，iAUC值为39.322 mm^2/s；F为放大100倍的HE染色病理切片，证实为甲状腺腺瘤

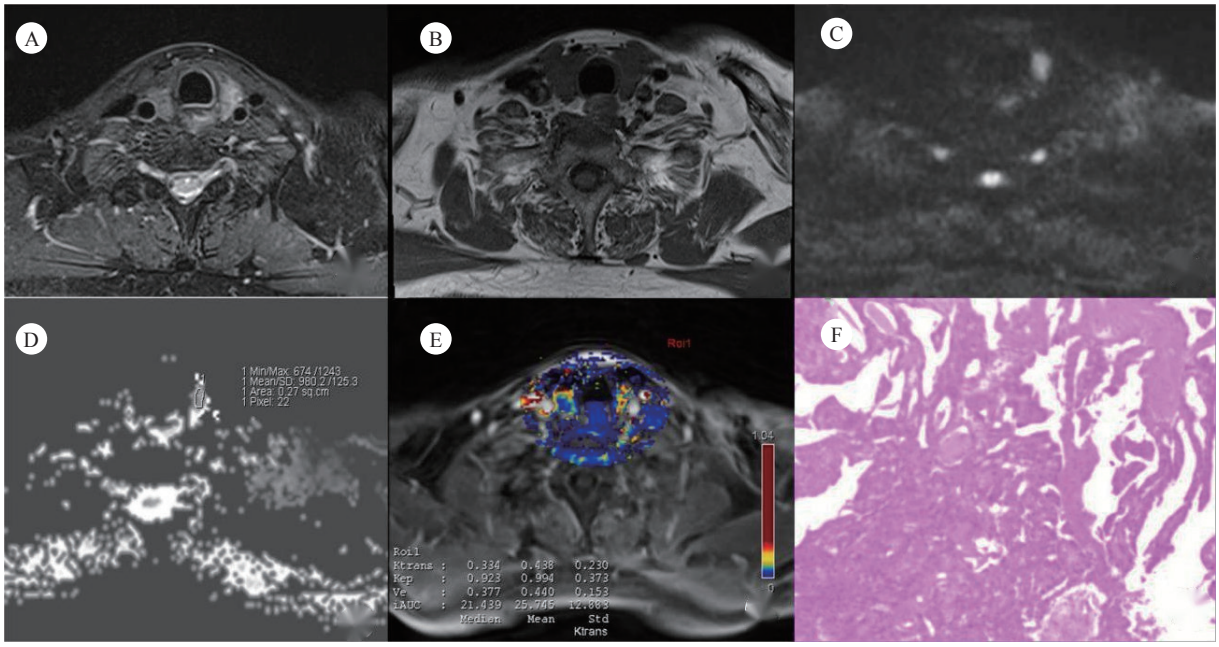


图 3 甲状腺乳头状癌的 MRI 图像 A 为在 T_2WI 序列上，甲状腺左叶可见不均匀高信号影，边界模糊，与周边组织境界不清；B 为在 T_1WI 序列上，结节呈等低信号；C 为 DWI 图，扩散受限；D 为 ADC 图，ADC 值为 0.980×10^{-3} mm^2/s；E 为 K^{trans} 图，K^{trans} 值为 0.438 min^{-1}，iAUC 值为 25.746 mm^2/s；F 为放大 100 倍的 HE 染色病理切片，证实为甲状腺乳头状癌

3 讨论

3.1 甲状腺结节形态学与血流动力学特征的诊断价值

本研究发现，甲状腺恶性结节的平均大小显著小于良性结节，表明在甲状腺结节良恶性鉴别中，结节大小作为一个重要的指标具有一定的诊断价值。然而，将本研究的结果与现有文献进行比较可以发现，关于甲状腺结节大小与其良恶性关系的讨论具有复杂性。Cong 等[11]研究指出，结节大小与恶性风险呈反比关系，42 枚良性结节的大小为（1.03 ± 0.70）cm，而 52 枚恶性结节的大小为（0.94 ± 0.70）cm。这与本研究结果相一致，都表明较小的甲状腺结节可能具有更高的恶性风险。有研究[12]发现，明确病理学结果的 1 205 名患者中，<4 cm 结节的恶性率为 51%，≥4 cm 结节的恶性率为 30%。≥4 cm 结节的恶性风险显著低于 <4 cm 结节（P <0.001）。当排除 <1 cm 结节并比较 1 ~ 4 cm 和 ≥4 cm 结节时，≥4cm 结节的恶性风险也显著降低（P =0.001）。但是，Hammad 等[13]分析发现，3.0 ~ 5.9 cm 结节的恶性风险比 <3.0 cm 的结节高 26%，而 ≥6.0 cm 的结节恶性风险反而降低 16%，这提示结节大小与恶性风险之间可能不存在线性关系。

良性结节中边界清楚的例数显著多于恶性结节，而边界不清楚的结节中恶性结节的比例显著高于良性结节，差异具有统计学意义（P <0.001）。Cong 等[11]通过评估甲状腺结节边缘的特定形态特征，发现边界不清晰、边缘不规则和分叶状边界是甲状腺恶性结节的重要预测因子。Zheng 等[14]对术后病理证实的 825 例甲状腺结节进行回顾性分析发现，边界不清楚是恶性肿瘤的独立预测因素。这些研究结果与本研究发现相呼应，都强调了边界特征在甲状腺结节良恶性鉴别中的重要性。

本研究中甲状腺良性结节多伴有囊变，而恶性结节多不伴有囊变。良性结节多为结节性甲状腺肿，双侧的甲状腺上动脉和甲状腺下动脉是甲状腺的主要供血动脉，甲状腺是一个有丰富血液供应的腺体，因此结节性甲状腺肿通常会导致出血、坏死、囊状变化、纤维化和钙化[15]。甲状腺癌癌细胞呈现密集排列，不易出现坏死和囊变，当甲状腺癌体积增大后，肿瘤细胞生长受血液供应限制，可能产生囊变和坏死[16]。本研究中恶性结节的大小

较小，发生囊变的枚数较少，因此甲状腺结节的良恶性无法仅凭是否伴有囊变来鉴别。

3.2 多参数MRI定量参数的诊断效能分析

RESOLVE通过读出方向上采用分段式采集方式缩短图像的采样时间，能够明显降低图像的失真、变形，提高信噪比（signal to noise ratio, SNR），更加清晰地显示解剖结构，故测得的ADC值也更加准确，已被广泛应用于头颈部病变的检查[17-19]。Zhu等[20]研究中，恶性甲状腺结节的ADC值明显低于良性结节，ADC值分别为（1.29 ± 0.27）× 10^{-3} mm^2/s和（1.85 ± 0.24）× 10^{-3} mm^2/s，且差异具有统计学意义（P<0.001），这一发现与本研究结果一致。ADC值是区分甲状腺结节良恶性的一个有效工具，其低值通常与恶性结节相关。这一现象可能与恶性结节内细胞密度增加、间隙减少有关，从而限制了水分子的扩散。因此，ADC值的测量为甲状腺结节的无创诊断提供了重要信息。

DCE-MRI是在静脉注射对比剂后对目标区域进行连续快速多时相扫描，通过对比剂缩短组织内质子T_1弛豫时间引发信号强度动态变化，并基于时间-信号强度曲线定量分析组织血流灌注与微血管通透性等血流动力学参数的成像技术。DCE-MRI已经运用于全身很多肿瘤的研究[21-23]，比如头颈部肿瘤、乳腺癌、妇科肿瘤、前列腺癌等。本研究中恶性结节的K^{trans}值及iAUC值显著低于良性结节，具有统计学意义。K^{trans}值代表单位时间内每单位体积组织中从血液进入血管外细胞外间隙的对比剂计量，反映了血管通透性及组织血流情况。Sedat等[24]发现恶性组的K^{trans}值明显低于良性组，且具有统计学意义，这与本研究相似。然而在乳腺、前列腺病变中，恶性病变的K^{trans}值明显高于良性病变[25-26]，这是由于恶性病变需要更多的营养和供氧，因此需要更多的新生血管，数量众多、不规则、曲折、脆弱、高渗透性的新生血管，造成血管通透性增加。但在甲状腺恶性病变中K^{trans}值明显低于良性病变，Sedat等[24]认为这是由于甲状腺血管床的激素释放更广泛，使甲状腺正常组织的血管通透性高于其他组织，而恶性组织的形成损伤了相关血管床的通透性，因此恶性组织较其他组织的血管通透性降低。本研究中恶性结节的K_{ep}值低于良性结节，但无统计学意义，这与Song等[27]研究有一定的差异，其研究发现恶性结节K_{ep}值显著低于良性结节（P=0.036），这可能是因为他们把直径>1.5 cm的甲状腺结节患者纳入研究，而不同大小甲状腺结节病灶内微观组织成分不同，在测量DCE-MRI定量参数时存在一定的影响。V_e值反映了血管外细胞外间隙容积，影响因素众多，所以是非常不稳定的[28]。

3.3 联合诊断模型的诊断价值与本研究的局限性

本研究结果显示，通过联合应用多参数MRI成像（包括iAUC值、ADC值及边界清晰度），能够有效地鉴别甲状腺结节的良恶性。特别是当这些参数联合使用时，ROC曲线下面积（AUC）达到0.986，表明该联合模型具有极高的诊断准确度。此外，为评估模型的泛化能力，将上述模型应用于未参与建模的内部验证集（27枚结节）。结果显示，该模型在独立数据集上保持了优异的判别效能（AUC=0.979），且未出现性能的显著下降，表明模型稳定可靠，未对训练数据产生过度拟合。

本研究仍存在一些局限性。第一，这是一个单中心研究，样本量不够大，入组患者是先经甲乳外科医生临床查体或者超声检查发现结节的，存在一定的选择偏移，未来需要结合多中心及更多的样本来验证当前结果或者获得更加准确的数据。第二，本研究仅使用一种对比剂，运用其他对比剂，如钆喷酸葡胺、钆布醇等所获得的数据可能存在差异，需要进一步研究。第三，本研究是人工勾画ROI，一定程度上存在主观因素的影响，后续如果能够引入半自动或自动勾画ROI的方法，可能结果更为客观可重复。

综上所述，多参数MRI成像技术在鉴别甲状腺结节良恶性上具有较高的诊断意义。甲状腺结节边界清晰度、ADC值及DCE-MRI的定量参数（K^{trans}值和iAUC值）对于区分良恶性甲状腺结节均具有一定的参考价值。联合诊断模型包括结节的iAUC值、ADC值及边界清晰度3个参数，该模型AUC值为0.986，高于单一参数AUC值，显示出较高的诊断效能。

目前，甲状腺结节良恶性诊断的最常用方法为超声成像技术，但是超声成像结果的解读存在一定

的主观性，与检查者的经验水平有较大关系，而多参数MRI成像技术可以提供更加客观的图像及测量数值，可以作为超声检查的补充手段，为临床诊断提供新的诊断依据。

[参 考 文 献]

[1] Miranda-Filho A, Lortet-Tieulent J, Bray F, et al. Thyroid cancer incidence trends by histology in 25 countries: a population-based study[J]. Lancet Diabetes Endocrinol, 2021, 9(4): 225-234.

[2] Grani G, Sponziello M, Pecce V, et al. Contemporary thyroid nodule evaluation and management[J]. J Clin Endocrinol Metab, 2020, 105(9): 2869-2883.

[3] Pizzato M, Li M, Vignat J, et al. The epidemiological landscape of thyroid cancer worldwide: GLOBOCAN estimates for incidence and mortality rates in 2020[J]. Lancet Diabetes Endocrinol, 2022, 10(4): 264-272.

[4] Holt E H. Current evaluation of thyroid nodules[J]. Med Clin North Am, 2021, 105(6): 1017-1031.

[5] 王奇政, 陈永晔, 张恩龙, 等. 动态对比增强磁共振在肿瘤预后预测中的研究进展[J]. 磁共振成像, 2019, 10(7): 556-560.

[6] Alexander L F, Patel N J, Caserta M P, et al. Thyroid ultrasound: diffuse and nodular disease[J]. Radiol Clin North Am, 2020, 58(6): 1041-1057.

[7] Qadan L, Ahmed A, Kapila K. Thyroid ultrasound reports: deficiencies and recommendations[J]. Med Princ Pract, 2019, 28(3): 280-283.

[8] 薛萍, 王峰先, 韩合理. 乳头状甲状腺癌CT、MRI表现及与病理对照研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(4): 28-29.

[9] 陈宇思, 张士德. 甲状腺结节的超声、CT及MRI影像学特征研究进展[J]. 现代肿瘤医学, 2022, 30(3): 552-555.

[10] 王奕文, 周哲, 孙占国. 磁共振成像在甲状腺结节诊断中的研究进展[J]. 磁共振成像, 2023, 14(8): 150-153, 181.

[11] Cong P, Wang X M, Zhang Y F. Comparison of artificial intelligence, elastic imaging, and the thyroid imaging reporting and data system in the differential diagnosis of suspicious nodules[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(1): 711-721.

[12] Sencar M E, Calapkulu M, Bostan H, et al. Effect of thyroid nodule size on cytology reliability and incidence of malignancy: a large cohort of 1205 patients from a single center[J]. Ann Endocrinol (Paris), 2023, 84(2): 238-241.

[13] Hammad A Y, Noureldine S I, Hu T, et al. A meta-analysis examining the independent association between thyroid nodule size and malignancy[J]. Gland Surg, 2016, 5(3): 312-317.

[14] Zheng T, Wang L, Wang H, et al. Prediction model based on MRI morphological features for distinguishing benign and malignant thyroid nodules[J]. BMC Cancer, 2024, 24(1): 256.

[15] 李文晶, 王浩, 陈永其, 等. 结节性甲状腺肿的MRI表现及与病理分型的对照分析[J]. 放射学实践, 2020, 35(11): 1403-1408.

[16] Paudyal R, Konar A S, Obuchowski N A, et al. Repeatability of quantitative diffusion-weighted imaging metrics in phantoms, head-and-neck and thyroid cancers: preliminary findings[J]. Tomography, 2019, 5(1): 15-25.

[17] 陈文, 胡昊, 许晓泉, 等. RESOLVE-DWI在甲状腺相关眼病诊断和分期中的应用价值[J]. 实用放射学杂志, 2019, 35(7): 1050-1053.

[18] 王鹏, 肖泽彬, 唐作华, 等. 常规MRI联合分段读出平面回波弥散加权成像在颞骨良恶性肿瘤鉴别诊断中的应用价值[J]. 中华解剖与临床杂志, 2020, 25(6): 606-611.

[19] 范培琳, 李钟惠, 韩华璐, 等. 基于平面回波成像读出方式的5T超高场多延迟动脉自旋标记灌注成像研究[J]. 现代仪器与医疗,2025,31(6):7-12.

[20] Zhu X, Wang J, Wang Y C, et al. Quantitative differentiation of malignant and benign thyroid nodules with multi-parameter diffusion-weighted imaging[J]. World J Clin Cases, 2022, 10(24): 8587-8598.

[21] 程瑜, 姚娟. DCE-MRI联合DWI评估乳腺癌新辅助化疗疗效方面的研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(1): 1406-1411.

[22] Zhou J, Zhang Y, Chang K T, et al. Diagnosis of benign and malignant breast lesions on DCE-MRI by using radiomics and deep learning with consideration of peritumor tissue[J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 51(3): 798-809.

[23] Ma M, Gan L, Jiang Y, et al. Radiomics analysis based on automatic image segmentation of DCE-MRI for predicting triple-negative and nontriple-negative breast cancer[J]. Comput Math Methods Med, 2021, 2021: 2140465.

[24] Sedat M S, Sade R, Kilic K, et al. The use of dynamic contrast-enhanced perfusion MRI in differentiating benign and malignant thyroid nodules[J]. Indian J Otolaryngol Head Neck Surg, 2019, 71(S1): 706-711.

[25] Jiang J, Xiao Z, Tang Z, et al. Differentiating between benign and malignant sinonasal lesions using dynamic contrast-enhanced MRI and intravoxel incoherent motion[J]. Eur J Radiol, 2018, 98: 7-13.

[26] Kataoka M, Honda M, Sagawa H, et al. Ultrafast dynamic contrast-enhanced MRI of the breast: from theory to practice[J]. J Magn Reson Imaging, 2024, 60(2): 401-416.

[27] Song M, Yue Y, Guo J, et al. Quantitative analyses of the correlation between dynamic contrast-enhanced MRI and intravoxel incoherent motion DWI in thyroid nodules[J]. Am J Transl Res, 2020, 12(7): 3984-3992.

[28] Li X, Huang W, Holmes J H. Dynamic contrast-enhanced(DCE) MRI[J]. Magn Reson Imaging Clin N Am, 2024, 32(1): 47-61.