·临床研究·

基于弥散加权成像多模型参数子宫内膜癌患者临床Ⅲ～Ⅳ期危险因素分析及列线图预测模型构建

何筱妍，王绍丹，徐婷婷

【摘要】目的　基于弥散加权成像（DWI）多模型参数子宫内膜癌（EC）患者临床Ⅲ～Ⅳ期危险因素分析及列线图预测模型构建。**方法**　收集 2023 年 1 月至 2025 年 1 月金华市人民医院收治的 EC 患者 112 例，临床分期为Ⅰ～Ⅱ期 75 例（早期组），Ⅲ～Ⅳ期 37 例（晚期组）。比较两组临床资料，构建基于标准表观扩散系数（ADC-stand）、慢速表观扩散系数（ADC-slow）及水分子扩散分布指数（DDC）对 EC 临床Ⅲ～Ⅳ期的预测模型，采用受试者工作特征（ROC）曲线分析模型预测效能，使用决策曲线评估模型在不同阈值概率下的净收益。**结果**　ADC-stand、ADC-slow 及 DDC 值低表达均为 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期的独立危险因素（均 $P < 0.05$），基于危险因素构建的列线图风险预测模型，ROC 曲线下面积为 0.937（95%*CI*：0.659 ～ 0.814）。模型预测曲线与理想线基本重合，*C-index* 值为 0.874。决策曲线分析发现，在高风险阈值为 0.00 ～ 1.00 时，净收益率＞ 0。**结论**　ADC-stand、ADC-slow 及 DDC 值低表达均为 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期的独立危险因素，以此构建的列线图风险预测模型具有较强预测能力。

【关键词】　子宫内膜肿瘤；癌；弥散加权成像；临床分期
doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.09.004
【中图分类号】　R445.2　**【文献标志码】**　A　**【文章编号】**　1671-0800(2025)09-0895-04

子宫内膜癌（endometrial carcinoma，EC）的临床分期是治疗方案和预后评估的重要因素，早期发现与准确分期对于提高患者生存率至关重要。传统分期方法主要依赖于手术病理检查，存在操作复杂、创伤大及可能延误治疗时机等局限性[1]。弥散加权成像（diffusion weighted imaging，DWI）作为一种功能磁共振成像技术，能够通过检测活体组织内水分子扩散运动来反映组织微观结构变化，近年来在肿瘤诊断与分期中展现出巨大潜力[2]。通过不同数学模型处理 DWI 数据能够为临床分期提供更加精确信息[3]。本研究基于 DWI 多模型参数分析 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期危险因素及构建列线图预测模型，现报道如下。

1　资料与方法

1.1　一般资料　收集 2023 年 1 月至 2025 年 1 月金华市人民医院收治的 EC 患者 112 例，纳入标准：（1）经手术病理检查证实为 EC；（2）根据国际妇产科联盟（international federation of gynecology and obstetrics，FIGO）[4]分期标准，临床分期明确为Ⅰ～Ⅳ期；（3）行 DWI 检查，图像质量满足分析要求；（4）临床、影像或病理资料完整。排除标准：（1）合并转移性 EC，或其他非原发性恶性肿瘤；（2）合并 DWI 检查禁忌证者；（3）妊娠期、哺乳期妇女；（4）既往有子宫手术史者。本研究获得金华市人民医院医学伦理委员会批准，免除/豁免知情同意。

1.2　方法　盆腔 MRI 扫描与常规 DWI 扫描均使用西门子 1.5 T Area MRI 扫描仪。

盆腔 MRI 扫描选用 8 通道体部相控阵线圈，扫描区域覆盖自髂骼关节延伸至耻骨联合层面范围。检查前患者需禁食 5 ～ 6 h，穿着无金属衣物并移除干扰物品，并适度憋尿，仰卧于 MRI 床，调整至舒适体位并确保盆腔位于磁场中心，以待检查。扫描序列及参数：（1）T_1 加权像（T_1WI），重复时间（TR）500 ms，回波时间（TE）10 ms，层厚 5 mm，层间距 1 mm，矩阵 256×256，视野（FOV）36 cm；（2）T_2 加权像（T_2WI），TR 为 2 000 ms，TE 为 100 ms，层厚 5 mm，层间距 1 mm，矩阵 256×256，FOV 为 36 cm；（3）脂肪抑制 T_2WI 采用短时反转恢复（short TI inversion recovery，STIR）技术，TR 为 3 000 ms，TE 为 60 ms，TI 为 150 ms，层厚 5 mm，层间距 1 mm，矩阵 256×256，FOV 为 36cm；（4）动态增强扫描使用钆喷酸葡胺注射液，

基金项目：　金华市科技计划项目（2023-4-110）
作者单位：　321000 浙江省金华，金华市人民医院
通信作者：　何筱妍，Email：qmeqc28066066@163.com

经肘前静脉注射，剂量 0.2 ml/kg，流率 2.0 ml/s。

增强扫描前行 DWI 扫描和多 b 值 DWI 扫描。常规DWI扫描采用单次激发平面回波成像（spin-shot echo planar imaging，SE-EPI）序列，TR 为 5 000 ms，TE 为 60 ms，b 值为 0、1 000 s/mm^2，层厚 5mm，层间距 1 mm，矩阵 128×128，FOV 为 36 cm；多 b 值 DWI 扫描参数：TR 为 5 000 ms，TE 为 68 ms，b 值为 0、500、800、1 000 、1 500 及 2 000 s/mm^2，层厚 5 mm，层间距 1 mm，矩阵 128×128，FOV 为 36 cm。

1.3 图形分析及处理 将上述影像扫描所得数据传至西门子工作站，经NUMARIS/4 软件处理。由 1 名放射科主治医师和 1 名副主任医师分别测量标准表观扩散系数（stand apparent diffusion coefficient，ADC-stand）、慢速表观扩散系数（slow apparent diffusion coefficient，ADC-slow）、快速表观扩散系数（fast apparent diffusion coeficient，ADC-fast）、灌注分数（perfusion faction，f）、水分子扩散分布指数（distributed diffusion coeeien，DDC）及扩散异质性指数（the heterogeneity of intravoxel diffusion，α）。结合 T_1WI、T_2WI 等影像，选择病变实质部分最大连续 3 个层面，手动勾画肿瘤兴趣区（region of interest，ROI），勾画ROI面积≥1 cm^2，注意避开肿瘤边缘、囊变坏死、出血及周围直肠、膀胱等区域。2 名医师对每个 ROI 进行 3 次重复测量并取均值，然后将 2 名医师均值再次取平均值作为最终 ROI 测量结果。

1.4 统计方法 数据采用 SPSS 26.0 软件分析，计量资料用均数±标准差表示，采用 t 检验；计数资料用例数表示，采用χ^2 检验。采用二元 Logistic 回归分析影响因素，采用决策曲线评估模型在不同阈值概率下净收益。采用受试者操作特征（ROC）曲线评估参数鉴别 EC 临床分期阈值、灵敏度及特异度。P < 0.05 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基本资料比较 112 例患者临床分期为Ⅰ～Ⅱ期 75 例（早期组），Ⅲ～Ⅳ期 37 例（晚期组）。两组 ADC-stand 值、ADC-slow 值及 DDC 值差异均有统计学意义（均 P < 0.05），见表 1。

2.2 危险因素分析 以临床分期作为因变量，ADC-stand值、ADC-slow值、DDC值作为自变量，并对变量进行赋值，进行二元 Logistic 回归分析。结果显示，ADC-stand、ADC-slow 及 DDC 值低表达均为 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期的独立危险因素（均 P < 0.05），见表 2。

2.3 列线图风险预测模型构建 基于影响因素构建 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期列线图风险预测模型，见图 1。

2.4 预测价值分析 分析显示，ADC-stand 值、ADC-slow值、DDC值及列线图模型预测EC患者临床Ⅲ～Ⅳ期曲线下面积（*AUC*）分别为 0.834、0.744、0.853 及 0.937；取*cut-off*值时，灵敏度分别为 0.640、0.600、0.827 及 0.865，特异度分别为 0.973、0.838、

表 1 两组基本资料比较

指标	早期组（n=75）	晚期组（n=37）	χ^2（t）值	P 值
年龄（岁）	48.4±4.4	49.3±5.2	（0.92）	＞0.05
体质量指数（kg/m^2）	22.87±2.34	23.25±1.29	（1.09）	＞0.05
绝经状态（已绝经/未绝经，例）	63/12	32/5	0.11	＞0.05
肿瘤分级（低/中/高，例）	14/53/8	7/21/9	3.77	＞0.05
组织学类型（腺癌/非腺癌，例）	60/15	28/9	0.27	＞0.05
心率（次/min）	75.74±7.48	77.49±8.44	（1.12）	＞0.05
收缩压（mmHg）	116.64±7.24	114.45±8.17	（1.44）	＞0.05
舒张压（mmHg）	75.43±6.47	73.15±7.09	（1.69）	＞0.05
空腹血糖（mmol/L）	5.64±1.00	5.34±1.00	（1.53）	＞0.05
ADC-stand 值（×10^{-3} mm^2/s）	1.32±0.43	0.85±0.20	（7.77）	＜0.05
ADC-fast 值（×10^{-3} mm^2/s）	76.33±20.24	68.82±19.17	（1.87）	＞0.05
ADC-slow 值（×10^{-3} mm^2/s）	0.55±0.21	0.38±0.17	（4.38）	＜0.05
f 值（%）	0.36±0.08	0.33±0.11	（1.73）	＞0.05
DDC 值（×10^{-3} mm^2/s）	1.12±0.31	0.72±0.22	（7.69）	＜0.05
α值	0.68±0.19	0.65±0.19	（0.80）	＞0.05

注：ADC-stand 为标准表观扩散系数，ADC-slow 为慢速表观扩散系数，ADC-fast 为快速表观扩散系数，f 为灌注分数，DDC 为水分子扩散分布指数，α为扩散异质性指数；1 mmHg≈0.133 kPa

0.730 及 0.920，见表 3 及封三图 4。

使用 Bootstrap 方法（执行 1 000 次迭代）对列线图模型实施内部验证显示，模型预测曲线与理想线基本重合，C-index 值为 0.874，表明预测能力较好，见封三图 5。决策曲线分析发现，在高风险阈值为 0.00 ～ 1.00 时，净收益率＞ 0，预测结果临床意义显著，且高风险阈值越小，净收益率越大，见封三图 6。

3　讨论

根据病变范围及转移情况，EC 临床分期分Ⅰ～Ⅳ期，不同分期患者预后差异显著[5]。DWI 作为一种无创影像学检查技术，在肿瘤诊断及分期中展现出独特优势，为 EC 分期诊断提供新视角[6]。本研究结果显示，EC 患者晚期组的 ADC-stand 值、ADC-slow 值及 DDC 值均低于早期组（均 $P < 0.05$）。提示晚期 EC 水分子扩散受限更明显，究其原因，肿瘤组织发展伴随着细胞外基质成分和结构改变，晚期 EC 中细胞外基质更加紧密和复杂，形成物理屏障进一步阻碍水分子扩散，且其中胶原纤维、蛋白聚糖等成分也可能与水分子相互作用，影响扩散速度[7]。此外，晚期 EC 肿瘤细胞膜结构和功能可能发生变化，通透性降低，使得水分子更难通过细胞膜扩散。肿瘤细胞增殖活跃、代谢旺盛还导致细胞内水肿，使细胞内液体积增加，细胞间隙进一步缩小，限制水分子扩散，并可能引起细胞膜变形和功能障碍[8]。

ADC-stand 值反映水分子在生物组织中扩散能力。与早期相比，晚期肿瘤组织明显增大，细胞密度显著增加，细胞间隙缩小，水分子扩散受限明显，ADC-stand 值降低[9]。ADC-slow 值也是评估肿瘤组织扩散特性重要参数，它特别关注于水分子扩散慢速成分。在晚期 EC 中，由于肿瘤细胞增殖活跃，细胞密度增加，细胞间隙减小等因素，水分子扩散慢速成分也受到限制，因此 ADC-slow 值也降低[10]。而 DDC 值是用于描述体素内水分子扩散系数连续分布的情况，进一步揭示晚期 EC 中水分子扩散复杂性和异质性。总之，晚期 EC 肿瘤组织往往具有更高异质性，包括细胞类型、密度、细胞外基质成分和结构等方面差异，使得水分子在肿瘤组织中扩散路径更加复杂多变[11]。

ADC-fast 值变化反映肿瘤组织灌注状态和血管生成情况，灌注量越大，ADC-fast 值越大，为评估肿瘤生长速度、侵袭性和预后提供潜在影像学指标。f

表 2　EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期影响因素分析

变量	β 值	*SE* 值	Wald χ^2 值	*P* 值	*OR* 值（95%*CI*）
ADC-stand 值	−3.959	0.992	15.92	＜ 0.05	0.019（0.003 ～ 0.133）
ADC-slow 值	−3.354	1.664	4.06	＜ 0.05	0.035（0.001 ～ 0.911）
DDC 值	−5.260	1.412	13.86	＜ 0.05	0.005（0.000 ～ 0.083）

注：ADC-stand 为标准表观扩散系数，ADC-slow 为慢速表观扩散系数，DDC 为水分子扩散分布指数

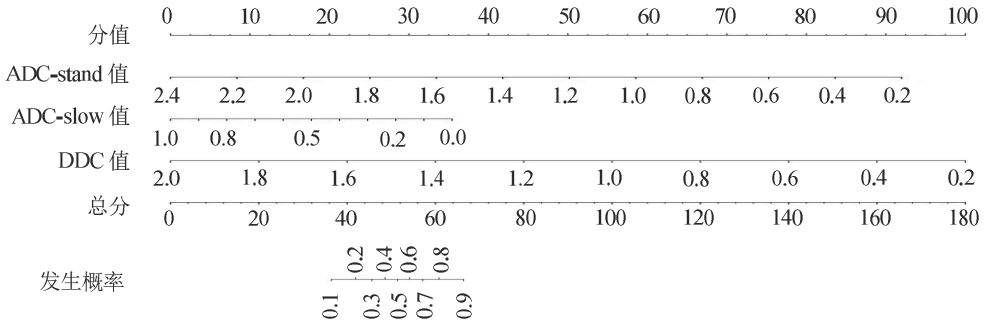


图 1　列线图风险预测模型构建

表 3　ADC-stand 值、ADC-slow 值、DDC 值及列线图模型预测 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期价值分析

变量	*AUC*（95%*CI*）	*SE* 值	*P* 值	*cut-off* 值	约登指数	灵敏度	特异度
ADC-stand 值	0.834（0.761 ～ 0.908）	0.037	＜ 0.05	1.175	0.613	0.640	0.973
ADC-slow 值	0.744（0.654 ～ 0.834）	0.046	＜ 0.05	0.520	0.438	0.600	0.838
DDC 值	0.853（0.780 ～ 0.926）	0.037	＜ 0.05	0.825	0.557	0.827	0.730
列线图模型	0.937（0.891 ～ 0.983）	0.023	＜ 0.05	0.457	0.785	0.865	0.920

注：ADC-stand 为标准表观扩散系数，ADC-slow 为慢速表观扩散系数，DDC 为水分子扩散分布指数

值代表快速扩散成分在总扩散信号中所占比例，它反映组织内快速扩散成分与慢速扩散成分的相对大小[12]。本研究结果显示，EC 晚期组 ADC-fast 值低于早期组（$P > 0.05$），这与张树茂等[13]研究结果相似。究其原因，在早期和晚期 EC 中，尽管肿瘤整体生长速度和侵袭性可能有所不同，但肿瘤组织内部局部灌注状态和扩散特性可能相似，从而导致 ADC-fast 值在两组间差异无统计学意义（$P > 0.05$）。

本研究结果显示，两组 f 值差异无统计学意义（$P > 0.05$），但随着 EC 从早期发展到晚期，肿瘤组织结构变得更加复杂。晚期肿瘤中出血、坏死、囊变等成分增多，这些成分显著影响水分子扩散。出血区域因红细胞存在而扩散特性不同；坏死和囊变区域形成液体或气体空腔，改变扩散路径[14]。这些复杂成分导致晚期肿瘤中快速扩散成分比例减少，从而使 f 值降低。α值用于描述体素内弥散速率不均匀性，反映肿瘤组织内部复杂结构。α值越小，表示组织越复杂，体素内弥散速率不均匀性越大；反之，α值越大，表示组织相对简单，体素内弥散速率不均匀性越小。本研究中，两组α值差异无统计学意义（$P > 0.05$），与李桂军等[15]研究结果相似。晚期血管结构异常和血流阻力增加均导致弥散速率不均匀性增加，进而降低α值。另外，α值亦可反映组织微观结构异质性。晚期肿瘤微环境发生变化，如细胞外基质改变、免疫细胞浸润等，这些变化影响肿瘤组织弥散特性[16]。

综上所述，ADC-stand、ADC-slow 及 DDC 值低表达均为 EC 患者临床Ⅲ～Ⅳ期独立危险因素，以此构建的列线图风险预测模型具有较强预测能力。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 何筱妍：实验操作、论文撰写；徐婷婷：数据整理、统计学分析；王绍丹：研究指导、论文修改、经费支持

参 考 文 献

[1] WANG Y A, HE M G, CAO P, et al. Tissue characteristics of endometrial carcinoma analyzed by quantitative synthetic MRI and diffusion-weighted imaging[J]. Diagnostics, 2022, 12(12): 2956.

[2] 王艳春,赵建立,黄秋晗,等.基于 r-FOV DWI 临床-影像组学模型预测宫颈癌临床分期的研究[J].临床放射学杂志,2024,43(7):1147-1153.

[3] BI Q, DENG Y C, XU N, et al. Differentiation of early-stage endometrial carcinoma from benign endometrial lesions: A comparative study of six diffusion models[J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15(1): 121-134.

[4] 刘海涛,宋天彬,马杰,等.基于扩散加权成像的全域子宫内膜纹理分析对早期子宫内膜恶性病变的诊断价值[J]. 中国医学影像学杂志,2022,30(6):593-599.

[5] WANG X H, BI Q, DENG C, et al. Multiparametric MRI-based radiomics combined with 3D deep transfer learning to predict cervical stromal invasion in patients with endometrial carcinoma[J]. Abdom Radiol, 2025, 50(3): 1414-1425.

[6] 金文韬,王添平,陈晓军,等.基于 MRI 的生境影像组学预测子宫内膜癌分子亚型的双中心临床研究[J].复旦学报(医学版),2024,51(6):890-899.

[7] 周芳,赵丹丹,郭臻,等.扩散加权成像影像组学特征联合表观扩散系数值对子宫内膜癌 p53 基因突变状态的预测价值[J]. 实用放射学杂志,2024,40(12):1998-2001.

[8] SHEN L, DAI B, DOU S W, et al. Estimation of TP53 mutations for endometrial cancer based on diffusion-weighted imaging deep learning and radiomics features[J]. BMC Cancer, 2025, 25(1): 45.

[9] 赵婧,杨帆,任继鹏,等.DWI 影像组学模型预测子宫内膜癌微卫星不稳定状态:与 ADC 值的对比研究[J].放射学实践,2024,39(8):1067-1071.

[10] ZHAO M L, WEN F, SHI J X, et al. MRI-based radiomics nomogram for the preoperative prediction of deep myometrial invasion of FIGO stage I endometrial carcinoma[J]. Med Phys, 2022, 49(10): 6505-6516.

[11] 牛永超,周芳,赵丹丹,等.基于 DWI 深度学习特征的预测模型评估子宫内膜癌微卫星不稳定状态的价值[J]. 中国医学影像学杂志,2024,32(9):922-927.

[12] 梁彩虹,刘玲,冀晓东,等.基于 MRI 影像组学诺模图预测子宫内膜癌患者术后无进展生存期[J].实用放射学杂志,2024,40(7):1116-1120.

[13] 张树茂,王全民,杨光杰,等.磁共振成像常规序列联合弥散加权成像多模型定量参数对子宫内膜癌及病理学分期的诊断研究[J]. 中国临床医生杂志,2022,50(8):968-971.

[14] 邓宇辰,毕秋,吴昆华.不同扩散成像模型在子宫内膜癌中的研究进展[J].国际医学放射学杂志,2024,47(5):599-604.

[15] 李桂军,文鹏,黄丽霞,等.不同数学模型多 b 值 DWI 在预测子宫内膜癌淋巴血管侵犯中的能力[J].昆明医科大学学报,2022,43(4):118-124.

[16] 王芳,刘颖,张宇威,等.多模态扩散加权成像评估早期子宫内膜癌淋巴脉管间隙浸润的价值[J]. 临床放射学杂志,2022,41(2):293-298.

收稿日期：2025-03-11

（本文编辑：钟美春）