

磁共振 T₂WI 纹理分析对前列腺癌雄激素剥夺治疗疗效评估的临床价值

蔚纳, 吴慧, 任嘉梁, 高阳, 刘挨师, 钱洛丹, 蔚晓玉, 牛广明

【摘要】 目的:探讨磁共振(MR)T₂WI 纹理分析对前列腺癌雄激素剥夺治疗(ADT)后的临床指导及鉴别治疗后残存病灶与周围良性组织的价值。**方法:**回顾性分析 2018 年 1 月—2019 年 5 月经本院穿刺病理证实为前列腺癌并进行 7 个月 ADT 治疗后的患者的病例资料。治疗后患者按照 PSA 水平及病理结果分组,所有患者行常规 T₁WI、T₂WI 和 DWI 扫描。采用 ITK-SNAP 软件在 T₂WI 上手动逐层勾画 ROI 采用 GE 公司的 AK 软件提取 308 个纹理特征。采用组内相关系数(ICC)评估特征可重复性,独立样本 *t* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验筛选出在每组间差异有统计学意义的纹理特征,采用 10 倍交叉验证法及 Lasso 回归模型对特征进行进一步的筛选和建模,多因素逻辑回归模型最终构建三个机器学习模型,采用 ROC 曲线及决策曲线(DCA)评估模型诊断效能。**结果:**纳入 ADT 治疗后疗效差患者 23 例,疗效好患者 20 例。筛选出 Correlation_angle135_offset4、Haralick Correlation_AllDirection_offset4_SD、Elongation、LowIntensityLargeAreaEmphasis 这 4 个特征构建模型一,构建的模型一评估前列腺癌 ADT 治疗后是否存在病灶的 ROC 曲线下面积(AUC)为 0.87,敏感度为 0.739,特异度为 0.75。筛选出 2 个纹理特征 VoxelValueSum、LongRunEmphasis_angle45_offset1 构建模型二,鉴别癌灶与中央腺的 AUC 为 0.91,敏感度为 0.81,特异度为 1。筛选出 GLCMEntropy_AllDirection_offset7_SD、LongRunEmphasis_angle135_offset4、LongRunHighGreyLevelEmphasis_AllDirection_offset4_SDNULADC 这 3 个特征构建模型三,鉴别癌灶与外周带的 AUC 为 0.87,敏感度为 0.952,特异度为 0.67。**结论:**MR T₂WI 纹理分析可以对前列腺癌 ADT 治疗后的不同疗效进行评估以指导下一步临床治疗,同时 MR T₂WI 纹理特征可以鉴别 ADT 治疗后残存病灶与周围良性组织。

【关键词】 雄激素剥夺治疗; 前列腺癌; 纹理特征磁共振成像

【中图分类号】 R445.2; R737.25 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2021)07-0905-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.07.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



MR T₂WI texture analysis for the evaluation of androgen deprivation therapy in prostate cancer YU

Na, WU Hui, REN Jia-liang, et al. Department of Imaging Diagnosis, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010050, China

【Abstract】 Objective: The value of MR T₂WI texture analysis in guiding clinical study after androgen deprivation therapy for prostate cancer and differentiating residual lesions from surrounding benign tissues after treatment. **Methods:** The patients with prostate cancer confirmed by puncture pathology in our hospital from January 2017 to December 2018 were retrospectively analyzed after 7 months of ADT treatment. After treatment, patients were divided into groups according to PSA level and pathological results. All patients were scanned by routine T₁WI, T₂WI and DWI sequences. ITK-SNAP software was used to manually sketch ROI layer by layer on T₂WI. The AK software of GE company was used to extract 308 texture features. Intra-group correlation coefficient (ICC) was used to evaluate feature repeatability, and independent sample *t*-test or Mann-Whitney *U* test was used to screen out texture features with statistically significant differences between groups, and 10-fold cross-validation method and Lasso regression model were used to further screen and model the features. Fi-

作者单位: 010050 呼和浩特, 内蒙古医科大学附属医院影像诊断科(蔚纳、吴慧、高阳、刘挨师、钱洛丹、蔚晓玉、牛广明); 100176 北京, 通用电气药业(上海)有限公司(任嘉梁)

作者简介: 蔚纳(1993-), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士, 住院医师, 主要从事腹盆部影像学研究。

通讯作者: 牛广明, E-mail: Cjr.niuguangming@vip.163.com

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目[2017MS(LH)0837]

nally, three machine learning models were constructed by multi-factor logical regression model, and the diagnostic efficiency of the model was evaluated by ROC curve and decision curve (DCA). **Results:** There were 23 patients with poor curative effect and 20 patients with good curative effect after ADT treatment. The four characteristics of Correlation_angle135_offset4, Haralick Correlation_AllDirection_offset4_SD, elongation and low intensity large area emphasis were selected to construct model one. The area under the ROC curve of the model one was 0.87. The sensitivity was 0.739 and the specificity was 0.75 to evaluate whether there were lesions in prostate cancer after ADT treatment. Two texture features voxel value sum and LongRunEmphasis_angle45_offset1 were selected to construct model 2. The area under the ROC curve was 0.91. The sensitivity was 0.81 and the specificity was 1. The three features of GLCMEntropy_AllDirection_offset7_SD, LongRunEmphasis_angle135_offset4, LongRunHighGreyLevelEmphasis_AllDirection_offset4_SDNULADC were selected to construct model 3. The area under the ROC curve, sensitivity and specificity for distinguishing cancer from peripheral zone were 0.87, 0.952 and 0.67 respectively. **Conclusion:** MR T₂WI texture analysis can be used to evaluate the different efficacy of ADT treatment for prostate cancer to guide the next clinical treatment. MR T₂WI texture features can be used to differentiate residual lesions from surrounding benign tissues after ADT treatment.

【Key words】 Androgen deprivation therapy; Prostate cancer; Texture feature; Magnetic resonance imaging

前列腺癌(prostate cancer, PCa)是男性最常见的恶性肿瘤之一,近年来我国 PCa 的发病率和死亡率逐年上升^[1]。早期 PCa 通过积极监测、手术、放疗进行控制,但局部晚期和转移阶段的治疗以雄激素剥夺治疗(androgen deprivation therapy, ADT)为主,通过手术或化学去势,文献报道 41% 的 PCa 患者将其作为一线治疗手段^[2]。然而,有一部分患者会对治疗产生抗药性进展为去势抵抗性前列腺癌(castration-resistant prostate cancer),文献报道其中 51% 的患者将在治疗后 5 年内进展为难治性前列腺癌^[3]。目前,还没有生物标记物可以预测那些肿瘤最有可能出现去势抵抗性,而 MRI 纹理分析是一种最新的技术,用来描述人眼看不到的像素值特征,反映像素值的微小变化,具有非侵入性研究前列腺癌对 ADT 治疗反应的潜力,可能有助于选择下一步临床治疗方案。

ADT 会影响 MR 图像上前列腺的外观及信号变化,雄激素缺乏引起腺体萎缩、纤维化导致正常外周带 T₂ 信号降低,影响肿瘤边缘的区分^[4-5],这可能高估治疗后肿瘤的存在。近年来,许多学者使用纹理分析对前列腺癌患者进行研究,例如前列腺癌与良性增生鉴别^[6]、监测风险分层^[7]、预测生化复发的模型^[8-9]等,而纹理分析在 ADT 患者中对前列腺癌的检出和描述还没有得到重视。虽然多参数 MRI (multi-parameter magnetic resonance imaging, mp-MRI) 包括 T₂ 加权成像(T₂-weighted imaging, T₂WI) 和扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI) 是检测 PCa 的准确工具,但在 ADT 治疗后的评估价值不太明确。因

此,笔者旨在探讨 MR T₂WI 纹理分析评估 PCa 患者对 ADT 的反应以指导下一步临床治疗,并研究从良性组织中分离残存病灶的价值。

材料及方法

1. 临床资料

回顾性分析 2018 年 1 月—2019 年 5 月符合以下标准的患者(图 1)。纳入标准:①入组患者治疗前经直肠超声引导穿刺证实为 PCa 且临床分期为 T2c 或更高;②患者从接受 ADT 开始至行 mp-MRI 检查的时间为 7 个月,且所有患者在检查时仍处于治疗状态;③疗效差组纳入标准为患者治疗后 PSA 水平升高,进行 mp-MRI 检查对可疑残留病灶进行超声穿刺,最后将病理详细结果(12 点穿刺包括进针角度、进针深度)与 mp-MRI 结合对残留病灶进行定位;④疗效好组纳入标准为患者治疗后 PSA 水平无升高、mp-MRI 无可疑病灶、病理结果阴性;⑤患者血清睾酮均达到去势水平, T < 50 ng/dL (< 1.7 nmol/L)。排除标准:①图像质量差不符合要求;②患者接受放疗或手术等其他治疗手段。雄激素剥夺通过用雄激素受体拮抗剂进行治疗,比卡鲁胺(口服 50 mg, 每天一次)或醋酸环丙孕酮(口服 100 mg, 每天三次)连续 7 天,随后皮下注射 10.8 mg 的促性腺激素释放激素类似物(戈舍瑞林),已知该方案可在 14 天内达到去势血清睾酮水平^[10]。

2. 检查方法

采用美国 GE 3.0T Discovery 750 MR 扫描仪,腹部相控阵线圈。扫描前患者适度充盈膀胱,取仰卧位,

扫描中心定位于耻骨联合上方 2 cm。扫描序列包括横轴面、矢状面和冠状面 T₂WI,横轴面 T₁WI 以及 DWI 序列。主要成像序列包括横轴面 FS T₂WI 和 DWI,FS T₂WI 旋回波序列 (TR 3471 ms, TE 85 ms, 层厚 4.0 mm, 间隔 1 mm, 激励次数 4, 矩阵 320×192, FOV 240 mm×240 mm。DWI 采集单次回波平面成像序列 (TR 3600 ms, TE 64.1 ms, 层厚 4.0 mm, 间隔 1 mm, 激励次数 8, 矩阵 128×128, FOV 400 mm×400 mm, b 值为 0, 1000 s/mm²)。

3. 图像分析

将所有患者的 MR 图像以 DICOM 格式从 PCAS 工作站导出并存储。在 T₂WI 图像上由 2 名经验丰富的盆腔磁共振医师对两组的全前列腺以及有病灶组 (经超声穿刺活检证实) 的周围带 (peripheral zone, PZ)、中央腺 (central gland, CG) 和病灶在 ITK-SNAP (版本 3.6.0, www.itksnap.org) 软件上沿着边缘逐层进行 ROI 勾画并合成三维兴趣容积 (volume of interest, VOI)^[11]。虽然 ADT 治疗后降低了 T₂WI 肿瘤的显著性,但仍可以发现原发病灶,在进行肿瘤 VOI 的勾画时参考 ADC 图。

纹理分析采用 GE 公司开发的 AK (Analysis-Kit, GE healthcare) 软件,从 T₂WI 上标注的 VOI 中提取全前列腺、病灶、外周带、中央腺所有的定量影像学特征,共 308 个放射学特征:一阶统计量、Haralick parameters (GLCM parameters)、RLM parameters、GLSZM parameters、Form factor parameters。对影像组学进行特征提取和分析:①数据预处理,异常值用中位数代替,对数据进行 z-score 标准化,以统一所有特征的尺度。②特征数降维,使用单因素逻辑回归,筛选出 P 值小于 0.05 的特征。用广义线性模型 LASSO (least absolute shrinkage and selection operator) 算法进行特征选择。③对筛选出的特征建立预测模型,采用多因素逻辑回归建立模型,以 Akaike 信息准则 (AIC) 作为停止原则,应用逆向逐级选择保留最佳特征子集。最终将剩余特征作为最佳鉴别特征并建立多因素逻辑回归模型,见图 2。

4. 统计分析

采用 R 软件 (版本 3.6.1, www.r-project.com) 对数据进行分析,采用组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 评价两名测量者间特征一致性,ICC>0.80 为一致性良好。进一步采 Kolmogorov-Smirnov 检验评价纹理特征是否符合正态分布,采用 Levene 检验进行方差齐性检验。正态分布且方差齐的纹理特征采用两独立样本 t 检验比较组间差

异,方差不齐者采用校正的 t 检验;不符合正态分布者采用非参数 Mann-Whitney U 检验。采用 Lasso 回归模型及 3 折交叉验证筛选出诊断效能最高的纹理特征组合,采用 logistic 回归构建模型。采用 ROC 评价模型的诊断效能,采用决策曲线分析 (decision curve analysis, DCA) 方法计算模型在临床不同阈值下获得的净收益值。所有检验水准为 0.05。

结 果

1. 患者资料

最终纳入 43 例 PCa 患者,年龄 (66.6±7.4) 岁,治疗前前列腺特异性抗原 (prostate specific antigen, PSA) “疗效差组”均值为 60.58 ng/mL,“疗效好组”均值为 77.52 ng/mL,差异无统计学意义 (t=1.67, P=0.79)。

2. 参数筛选及模型建立

在所提取的 308 个特征中,ICC 为 0.43~0.99,在模型一中删除 59 个 ICC≤0.8 的纹理特征,模型二中删除 36 个 ICC≤0.8 的纹理特征,在模型三中删除 54 个 ICC≤0.8 的纹理特征。一致性良好的纹理特征中,经过 t 检验或 Mann-Whitney U 检验删除无统计学意义的纹理特征,单因素逻辑回归筛选出 P 值小于 0.05 的特征。对筛选后的纹理特征进行 Lasso 回归及交叉验证 (图 3a、b),得到最终特征 (表 1)。

3. 模型效能评估

构建的 3 个模型的 ROC 曲线下面积、敏感度、特异度、符合率见表 2。

模型一评估 PCa 经 ADT 治疗后的疗效,其 Rad 分值图中 (图 3c),分值越大越倾向于 ADT 治疗后癌

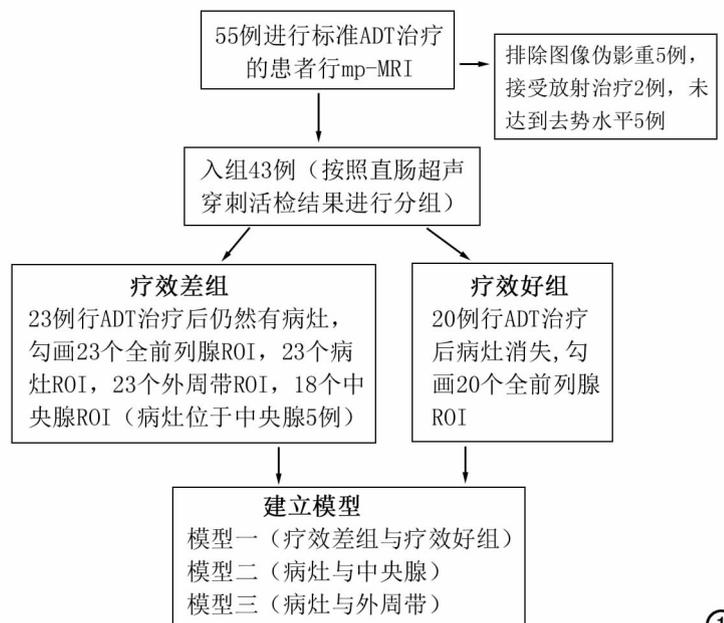


图 1 病例纳入及分组。

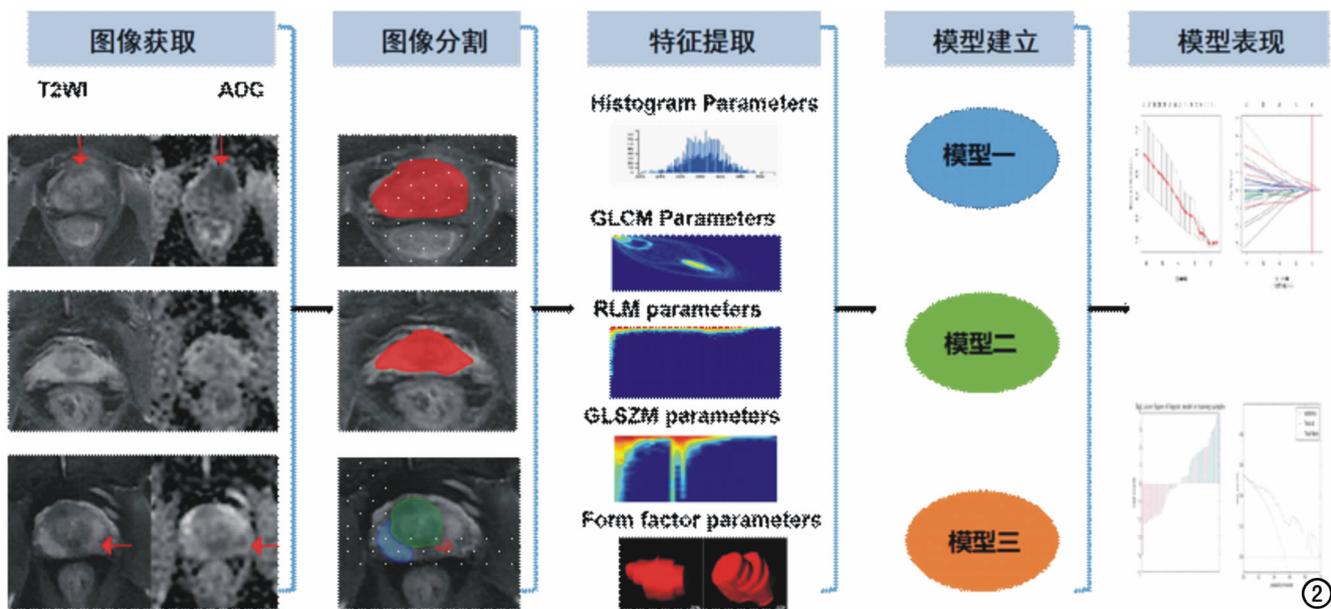


图2 纹理分析工作流程。前列腺图像纳入 T₂WI 为分割图,ADC 图像为参考图。图像分割中,由上到下分别为:疗效差组全前列腺体积分割,病灶位于前列腺中央腺(红箭);疗效好组全前列腺体积分割;疗效差组中病灶(红色覆盖区),外周带(蓝色覆盖区),中央腺(绿色覆盖区)体积分割。提取特征的示例,展示了 T₂WI 信号的直方图特征、纹理特征以及形态特征。最后建立 3 个模型并进行效能评估。

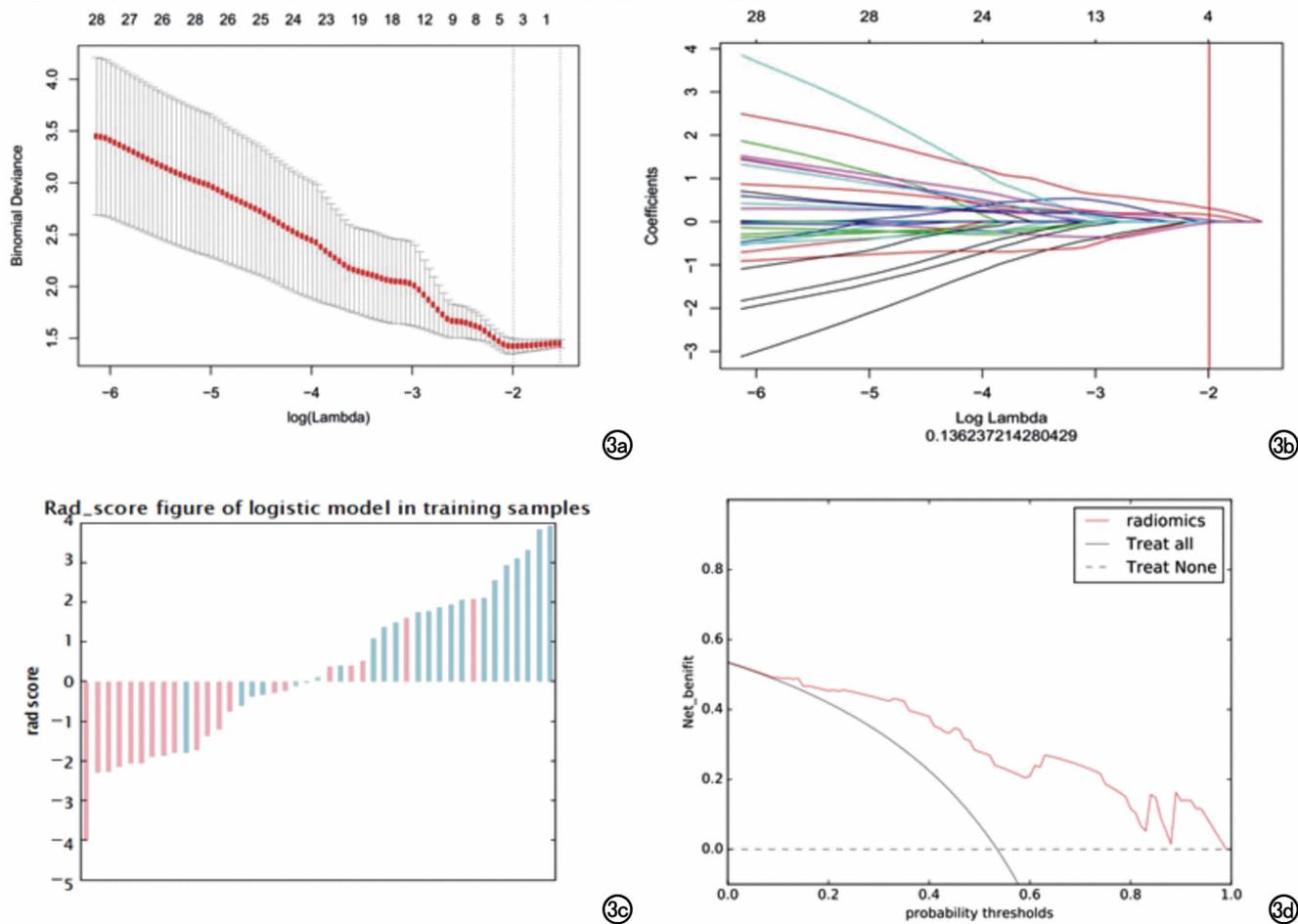


图3 a) 模型一 LASSO 算法调节参数 $\log(\alpha)$ 的选择; b) 模型一 308 个组学特征在模型中的系数,垂直线表明经过 3 折交叉验证后的最佳选择 $\log(\alpha)$,获得 4 个系数非零的特征; c) 模型一的预测分值图,粉色代表无病灶组,蓝绿色代表有病灶组,分值越大越倾向于有病灶; d) 模型一的 DCA 曲线,表示不同风险阈值下的净获益。

表1 构建3个模型的T₂WI纹理特征

模型	特征类型	特征名称
模型1	GLCM	Correlation
	GLCM	Haralick Correlation
	Form factor parameters	Elongation
	GLSZM	LowIntensityLargeAreaEmphasis
模型2	Form factor parameters	VoxelValueSum
	RLM	LongRunEmphasis
模型3	GLCM	Entropy
	RLM	LongRunEmphasis
	GLSZM	LongRunHighGreyLevelEmphasis

表2 构建的3个模型的诊断效能

模型	AUC	敏感度	特异度	符合率
模型1	0.87	0.739	0.75	0.74
模型2	0.91	0.810	1	0.89
模型3	0.87	0.952	0.67	0.81

灶的残存或复发,分值 >0 代表预测为ADT治疗后病灶的残存或复发,分值 <0 代表ADT治疗后效果好无残留或复发的病灶,在分值 <0 的阴性组中有6例患者出现假阴性,在分值 >0 的阳性组中有5例患者出现假阳性。模型一的DCA(图3d)表示不同风险阈值下的净获益,当风险阈值在训练组为10%~99%时,采用纹理分析评估前列腺癌ADT治疗效果的方法所获得的临床净收益值大于临床全部进行干预与都不干预的净收益值。

讨论

1. 基于MR T₂WI纹理分析对PCa ADT后指导临床治疗的意义

早期测量体内对治疗反应的能力可能是预测结果的一个有力工具,并有助于选择需要进一步辅助治疗的患者。顾伟光等^[12]研究发现DCE-MRI定量参数在PCa内分泌治疗后有改变,可用于临床PCa疗效检测指标PSA的补充,以提高对治疗后肿瘤的检测效能,与本研究有相同初衷。Groenendaal等^[13]采用多元线性回归分析,研究了ADT后0~3个月和 ≥ 3 个月患者的DWI和DCE-MRI参数图的差异,结果发现 ≥ 3 个月ADT组肿瘤组织的扩散和灌注明显高于0~3个月ADT组,肿瘤的显著性降低。在 ≥ 3 个月治疗组的患者中,可以根据MR图像确定可疑病灶指导放射治疗。在目前的临床实践中,ADT和体外照射治疗(external beam radiotherapy, EBRT)的结合被认为是金标准治疗^[14-15]。在许多研究中,治疗模式若从单纯的ADT转向ADT联合EBRT,这种变化将大大延长PCa患者的存活率^[16]。所以ADT治疗期间检出前列腺癌就显得异常重要。笔者建立的模型一中Correlation_angle135_offset4、Haralick Correlation_All-Direction_offset4_SD、Elongation、LowIntensity-LargeAreaEmphasis这四个纹理特征的组合可以将不

同的治疗效果区分开,AUC达到0.84,虽然在模型中出现了6例假阴性但是它们的共同特点是外周带治疗后腺泡萎缩在T₂WI信号减低,病灶的显著性减低像素值与周围良性组织难以识别。5例假阳性,由于治疗后外周带在T₂WI出现局限性低信号影,但在DWI及ADC图并没有表现出恶性征象,所以敏感度、特异度低是模型未来需要改进的重点。作为预测模型,纹理特征在评估疗效方面具有可行性,后期通过提高数据量,有望进一步增加模型诊断的符合率,纹理特征可作为ADT患者是否需要进一步EBRT干预的独立纳入标准。

2. 基于MR T₂WI纹理分析检出ADT后残存病灶的价值

ADT导致前列腺腺泡萎缩、纤维化和基底细胞增生,从而减少总腺体间质组织,最终导致总腺体体积减少。同时正常外周带T₂信号减低,从而影响肿瘤边缘的区分,在扩散加权成像中扩散受限,导致整个前列腺信号有所增高^[17],目前采用mp-MRI方法判定ADT后PCa符合率尚不理想,纹理分析能够提供丰富的定量特征,在PCa的诊断和治疗评估中有良好的应用前景^[18]。在模型二与模型三探讨了区分前列腺良性组织和肿瘤组织的可行性,AUC分别为0.91、0.87。Daniel等^[19]研究了经ADT治疗后使用mp-MRI纹理分析从良性组织中分离肿瘤组织,结果发现纹理特征在肿瘤和周围健康组织之间存在差异,为下一步EBRT的局灶治疗提供基础,与本研究结果一致。在模型二中体素像素值总和(voxel value sum)表现出差异,原因可能在于ADT治疗之后病灶明显缩小,而中央腺体较大进而影响像素点总和,使得其表现出优势,但是符合我们的模型。在组织分类功能方面,模型二及模型三的T₂WI纹理特征优于相应的直方图参数,证明T₂WI纹理特征可以很好地将ADT治疗后肿瘤与周围良性组织区分开。

本研究尚存在一定的局限性:①由于样本量有限,未能构建验证集对模型进行进一步验证,但笔者在筛选参数时,采用3折交叉验证方法,可以在一定程度上避免模型过度拟合。②本研究的总人数较少($n=43$),只探讨了ADT后的疗效评估,后期我们将通过提高数据量将MR纹理特征与前列腺病理及组织学联系起来。③本研究只使用了MR T₂WI提取特征,因其能够提供高分辨率图像可进行精确的ROI勾画直接影响提取特征的结果,由于DWI信噪比低、分辨率不足未能将其作为分析模型^[20-21]。④目前的研究只能对ADT治疗患者进行指导,不能为精准放疗提供肿瘤勾画的技术支持,但所提出的结果为下一步干预治疗奠定了基础。随着ADT患者人数增加,临床需

要评估 ADT 的疗效以及提高对病灶检出,为下一步诊疗计划提供依据。

综上所述,MR T₂WI 纹理分析可用于前列腺癌 ADT 的疗效评估并可检出治疗后残存的病灶,对临床 PCa 进一步诊疗计划具有重要的价值。

参考文献:

- [1] Chen W, Zheng R, Baade PD, et al. Cancer statistics in China, 2015 [J]. *CA Cancer J Clin*, 2016, 66(2): 115-132.
- [2] Teo MY, Rathkopf DE, Kantoff P. Treatment of advanced prostate cancer [J]. *Annu Rev Med*, 2019, 70(1): 479-499.
- [3] Hall ME, Huelster HL, Luckenbaugh AN, et al. Metastatic hormone-sensitive prostate cancer: current perspective on the evolving therapeutic landscape [J]. *Onco Targets Ther*, 2020, 13: 3571-3581.
- [4] Htker AM, Mazaheri Y, Zheng J, et al. Prostate cancer: assessing the effects of androgen-deprivation therapy using quantitative diffusion-weighted and dynamic contrast-enhanced MRI [J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(9): 2665-2672.
- [5] Sun F, Wu K, Yao Z, et al. Long noncoding RNA LINC00963 induces NOP2 expression by sponging tumor suppressor miR-542-3p to promote metastasis in prostate cancer [J]. *Aging (Albany NY)*, 2020, 12(12): 11500-11516.
- [6] Sidhu HS, Benigno S, Ganesan B, et al. Textural analysis of multiparametric MRI detects transition zone prostate cancer [J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(6): 2348-2358.
- [7] Algohary A, Viswanath S, Shiradkar R, et al. Radiomic features on MRI enable risk categorization of prostate cancer patients on active surveillance: preliminary findings [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(3): 818-828.
- [8] Shiradkar R, Ghose S, Jambor I, et al. Radiomic features from pretreatment biparametric MRI predict prostate cancer biochemical recurrence: preliminary findings [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(6): 1626-1636.
- [9] Gnep K, Fargeas A, Gutiérrez-Carvajal RE, et al. Haralick textural features on T₂-weighted MRI are associated with biochemical recurrence following radiotherapy for peripheral zone prostate cancer [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 45(1): 103-117.
- [10] Byrne NM, Nesbitt H, Ming L, et al. Androgen deprivation in LNCaP prostate tumour xenografts induces vascular changes and hypoxic stress, resulting in promotion of epithelial-to-mesenchymal transition [J]. *Br J Cancer*, 2016, 114(6): 659-668.
- [11] Comelli A, Bignardi S, Stefano A, et al. Development of a new fully three-dimensional methodology for tumours delineation in functional images [J]. *Comput Biol Med*, 2020, 120: 103701.
- [12] 顾伟光, 赵文露, 杨毅, 等. DCE-MRI 定量参数对前列腺癌内分泌治疗的疗效评价 [J]. *放射学实践*, 2017, 32(11): 1187-1190.
- [13] Groenendaal G, Vulpes MV, Pereboom SR, et al. The effect of hormonal treatment on conspicuity of prostate cancer: Implications for focal boosting radiotherapy [J]. *Radiother Oncol*, 2012, 103(2): 233-238.
- [14] Rijksen BLT, Pos FJ, Hulshof MCM, et al. Variation in the prescription of androgen deprivation therapy in intermediate- and high-risk prostate cancer patients treated with radiotherapy in the Netherlands, and adherence to European Association of Urology guidelines: A population-based study [J]. *Eur Urol Focus*, 2019, (19): 30346-30353.
- [15] South A, Parulekar WR, Sydes MR, et al. Estimating the impact of randomised control trial results on clinical practice: results from a survey and modelling study of androgen deprivation therapy plus radiotherapy for locally advanced prostate cancer [J]. *Eur Urol Focus*, 2016, 2(3): 276-283.
- [16] Sargos P, Mottet N, Bellera C, et al. Long-term androgen deprivation, with or without radiotherapy, in locally advanced prostate cancer: updated results from a phase III randomised trial [J]. *BJU Int*, 2020, 125(6): 810-816.
- [17] Son MJV, Peters M, Ir MAM, et al. MRI-guided ultrafocal salvage high-dose-rate brachytherapy for localized radiorecurrent prostate cancer: updated results of 50 patients [J]. *Int J Radiat Oncol Biol*, 2020, 107(1): 126-135.
- [18] 范婵媛, 闵祥瑞, Li Quibai, 等. 基于 ADC 图的纹理分析在低、高级别前列腺癌诊断中的价值 [J]. *中华放射学杂志*, 2019, 53(10): 859-863.
- [19] Daniel M, Kuess P, Andrzejewski P, et al. Impact of androgen deprivation therapy on apparent diffusion coefficient and T₂W MRI for histogram and texture analysis with respect to focal radiotherapy of prostate cancer [J]. *Strahlenther Onkol*, 2019, 195(5): 402-411.
- [20] Lin YC, Huang HM. Denoising of multi b-value diffusion-weighted MR images using deep image prior [J]. *Phys Med Biol*, 2020, 65(10): 105003.
- [21] Chen YL, Lin YJ, Lin SH, et al. The effect of spatial resolution on the reproducibility of diffusion imaging when controlled signal to noise ratio [J]. *Biomed J*, 2019, 42(4): 268-276.

(收稿日期: 2020-07-06 修回日期: 2020-11-05)