

前列腺癌根治术后生化复发相关 MRI 影像组学特征的研究*

朱学华 邵立智^① 颜 野 刘泽南 何继德 马潞林 卢 剑**

(北京大学第三医院泌尿外科, 北京 100191)

【摘要】 目的 基于双参数磁共振成像(biparametric magnetic resonance imaging, bp-MRI)探讨影响前列腺癌根治术(radical prostatectomy, RP)后生化复发(biochemical recurrence, BCR)的影像组学特征。**方法** 回顾性分析我科 2010 年 1 月~2016 年 6 月 278 例 RP 患者的临床资料,术后至少随访 3 年,86 例(30.9%)发生 BCR。以患者术后病理切片为参考,采用认知融合的方式在术前 mpMRI 相应层面的 T2WI 和表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图片上勾画前列腺癌灶轮廓,获得感兴趣区(region of interest, ROI),对 MRI 片 ROI 内的影像组学特征进行提取。最小绝对选择与收缩算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)回归联合 Cox 回归模型用于影像组学特征降维、筛选及影像组学标签构建。单因素和多因素 Cox 回归分析影响 BCR 的预后因素。**结果** 由 T2WI 和 ADC 图中各获取 444 个影像组学特征,共 888 个影像组学特征。通过 LASSO 回归进行特征降维及筛选,最终获得 6 个非零参数的影像组学特征。基于上述特征,结合 Cox 回归模型构建影像组学标签。多因素 Cox 回归分析显示影像组学标签($HR = 2.404, 95\% CI: 1.543 \sim 3.747, P = 0.000$)与国际泌尿病理协会(International Society of Urological Pathology, ISUP)分级($HR = 1.235, 95\% CI: 1.027 \sim 1.486, P = 0.025$)是 BCR 的独立预后因素。**结论** 共获得 6 个非零系数的 bp-MRI 影像组学特征,以此构建的影像组学标签与 RP 后 BCR 显著相关。该标签可能有助于辅助识别 RP 治疗后 BCR 高风险的前列腺癌患者。

【关键词】 前列腺癌; 影像组学; 前列腺癌根治术; 生化复发

文献标识:A 文章编号:1009-6604(2023)05-0359-08

doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2023.05.008

MRI-based Radiomics Features Associated With Biochemical Recurrence of Prostate Cancer After Radical Prostatectomy

Zhu Xuehua*, Shao Lizhi, Yan Ye*, et al.* Department of Urology, Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China

Corresponding author: Lu Jian, E-mail: lujian@bjmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To evaluate the biparametric magnetic resonance imaging (bp-MRI) based radiomics features associated with the biochemical recurrence (BCR) after radical prostatectomy (RP). **Methods** A total of 278 patients with prostate cancer who underwent RP in our department from January 2010 to June 2016 with a minimum of 3-year follow-ups were retrospectively investigated. The preoperative bp-MRI images of T2WI and apparent diffusion coefficient (ADC) at the corresponding level were identified by cognitive fusion with the reference of a pathological section to outline the tumor, and subsequently the region of interest (ROI) was acquired. Radiomic features in the ROI were extracted. The least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression algorithm combined with the Cox regression model was used for feature dimensionality reduction, selection, and signature construction. Univariate and multivariate Cox regression were used to identify the prognostic factors of BCR. **Results** A total of 888 radiomics features were acquired from T2WI and ADC images (444 features for each). Through the LASSO regression for feature

* 基金项目:北京市自然科学基金(Z200027、L212051);北京大学第三医院-院队列建设项目 B 类(BYSYDL2021012)

** 通讯作者, E-mail: lujian@bjmu.edu.cn

① (中国科学院自动化研究所分子影像重点实验室, 北京 100190)

dimensionality reduction and selection, 6 radiomics features with non-zero coefficients were identified. Based on the above features, the Cox regression model was utilized to construct a radiomics signature. In the multivariate analysis, the radiomics signature ($HR = 2.404$, 95% CI : 1.543 – 3.747, $P = 0.000$) and International Society of Urological Pathology (ISUP) grade ($HR = 1.235$, 95% CI : 1.027 – 1.486, $P = 0.025$) were independent prognostic factors of BCR. **Conclusions** Six imaging features with non-zero coefficients and the radiomics signature built from them are significantly correlated with BCR after RP. This signature may help identify prostate cancer patients with high risk of BCR following RP.

【Key Words】 Prostate cancer; Radiomics; Radical prostatectomy; Biochemical recurrence

前列腺癌是男性生殖系统最常见的恶性肿瘤,是欧美国家导致死亡的第二大恶性肿瘤^[1]。中国前列腺癌发病率低于欧美。近年来,伴随人口老龄化及前列腺癌筛查的普及,前列腺癌发病率逐年提升^[2]。前列腺癌根治术(radical prostatectomy, RP)是目前治疗器官局限性和局部进展期前列腺癌的主要方式^[3]。RP术后患者局部复发或远处转移前首先表现为前列腺特异抗原(prostate specific antigen, PSA)水平的升高,预示患者有可能出现生化复发(biochemical recurrence, BCR)。BCR是前列腺癌局部复发和远处转移的前兆。RP后10年内27%~53%的患者发生BCR,其中约2/3的患者发生于术后2~3年内,BCR往往预示着患者生存期缩短^[4]。对于RP术后BCR高风险患者,新辅助内分泌治疗及术后早期内分泌治疗或放疗可能会改善患者预后^[5,6]。因此,早期识别BCR高风险的患者具有重要的临床意义。目前,多数研究基于临床指标对BCR风险进行评估及预测,探讨影像组学特征与BCR关系的相关研究较少^[7-13]。

影像组学通过计算机算法深度挖掘和提取医学影像信息,对其蕴含的肿瘤异质性进行深度分析,从而获得反映肿瘤异质性的影像组学特征,进而用于肿瘤的诊断及预后评估^[14]。影像组学特征可分为4类特征。①一阶统计量特征:主要为直方图特征,描述与感兴趣区(region of interest, ROI)内的体素强度分布有关的特征,可通过直方图分析计算得到,包括均数、中位数、最小值、最大值、标准差、偏度和峰度等。②纹理特征:是描述体素空间分布强度等级的特征,包括灰度共生矩阵、灰度游程矩阵、灰度级带矩阵和邻域灰度差分矩阵等。③形态特征:描述ROI大小的特征,例如体积、表面积、二维和三维的最大直径以及有效直径等特征。④小波特征:经小波分解计算获得原始图像的强度和纹理特征,将特

征集中在肿瘤体积内的不同频率范围^[15]。双参数磁共振成像(biparametric magnetic resonance imaging, bp-MRI)包含组织器官的解剖序列和功能序列,是目前临床诊断前列腺癌最准确的无创检查之一^[16]。另外, bp-MRI常用于患者发生BCR并可能伴有局部复发时的监测,包括监测盆腔残留病灶复发及局部淋巴结转移情况。本研究基于前列腺癌患者术前bp-MRI的T2WI序列和表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图,以术后病理切片为参考,勾画肿瘤轮廓,获得ROI并提取筛选及构建与RP治疗后BCR相关的影像组学标签,为临床医师进行BCR风险评估提供新的思路。

1 对象与方法

1.1 研究对象

本研究通过北京大学第三医院医学科学研究伦理委员会审批(批文号:IRB00006761-M2021358),是基于前列腺癌队列的单中心病例-对照研究。回顾性分析2010年1月~2016年6月我院448例RP的临床、影像及病理资料,根据纳入及排除标准,最终278例纳入本研究。纳入标准:①术前完善3.0T MRI检查,T2WI及ADC无缺失;②术前穿刺及术后病理均证实为前列腺腺泡腺癌;③出现观察终点BCR或未出现BCR但术后至少随访3年。BCR定义为RP术后连续2次PSA>0.2 ng/ml^[17]。排除标准:①MRI图像上无法识别瘤灶;②其他病理类型如前列腺导管腺癌或混合病理类型;③临床信息不完整;④术前接受新辅助内分泌治疗或放疗;⑤术前淋巴结转移或远处转移

1.2 方法

1.2.1 MRI检查方法 所有患者经直肠穿刺前完善3.0T MRI检查。MRI图像中的T1WI、T2WI、DWI和ADC图均导出并以DICOM格式保存。影像

组学特征提取自 T2WI 和 ADC,其他序列用于癌灶识别参考。

1.2.2 bp-MRI 肿瘤轮廓勾画 2 位经验丰富的影像学专家共同阅读每一位患者的所有 MRI,根据前列腺影像报告和数据库评分系统 (Prostate Imaging Reporting and Data System, PI-RADS) 评分确定癌灶并对癌灶进行勾画^[18]。本研究为尽可能保证癌灶勾画的准确性,本课题组在前期工作中获得了部分患者的术后病理切片,在 PI-RADS 评分基础上,以病理大切片中癌灶的位置及范围为参考,采用认知融合的方式借助 ITK-SNAP 软件 (版本 3.6.0) 在 MRI 影像片相应层面进行手动瘤灶标注^[19]。

1.2.3 影像学特征提取与统计分析

图像强度的标准正态分布通过 Z-score 标准化获得。通过 Pyradiomics 软件 (版本 2.1.1, <https://github.com/Radiomics/pyradiomics>) 基于 bp-MRI T2WI 序列及 ADC 图进行影像组学特征提取。通过 R 软件单变量及多变量 Cox 回归分析进行特征降维及筛选,构建并分析影像组学标签与 BCR 的关系。该方法具有成熟的技术流程,在探讨影像组学特征与预后相关研究中已广泛应用^[20,21],具体过程如下。

首先,使用单变量 Cox 模型对所有影像组学特征进行逐一分析,筛选出 BCR 组与无 BCR 组间具有差异 ($P < 0.1$) 的特征。Cox 的原理如公式 (1) 所示。其中 X_i 代表某个影像组学特征,该过程由算法自动实现。经过单变量 Cox 模型筛选后,仍有较多的影像组学特征,这些特征需要通过最小绝对选择与收缩算子 (least absolute shrinkage and selection operator, LASSO) 回归进一步筛选。LASSO 回归是实现影像组学特征降维和选择的重要方法之一。LASSO 回归也叫做 L1 范数正则化,即通过在线性回归的目标函数中加入 L1 范数,即向量中各个元素绝对值之和,如公式 (2) 所示。公式 (2) 中, X 代表某个影像组学特征,通过构建回归方程,对不同的影像组学特征赋予不同的系数 (模型自动实现),通过 L1 正则化项使部分系数变成 0,这部分系数所对应的特征视为非显著特征而直接舍弃,从而达到特征筛选的目的。该过程需要确定一个参数来控制选择的特征数量, λ 越大, LASSO 筛选特征的力度越大,最终保留的特征越少。在确定最优值时,算法既要

避免保留的特征过多造成模型的过拟合,又要避免特征数量过少影响模型的预测性能。本研究采用留一交叉验证法,根据偏似然 (partial likelihood) 最小值选择最优 λ 。如图 1 所示,横轴为 $\log(\lambda)$ 的取值,纵轴为偏似然值,右侧虚线是模型具备优良性能同时特征数量最少时的值,此时对应的特征数量为 6,因此,最终保留 6 个影像组学特征。在 L1 正则化之后,绝大多数影像组学特征的系数降为 0,随后获得 6 个非零系数的影像组学特征。然后我们基于上述 6 个特征,通过 Cox 模型构建影像组学标签,并通过多因素分析的方法确定该标签与 BCR 的关系。影像组学的工作流程见图 2。

$$(1) h(t, X_i) = h_0(t) \times \exp(X_i \beta)$$

$$(2) \hat{\beta}_{Lasso} = \operatorname{argmin}_{\beta \in R^d} (\|Y - X\beta\|^2 + \lambda \sum_{j=1}^d |\beta_j|)$$

1.3 统计学处理

数据统计及分析采用 R 软件 3.1.0 及 SPSS 27.0。通过 R 软件 LASSO 回归进行影像组学特征筛选,通过 SPSS Cox 回归模型进行单因素和多因素分析筛选与 BCR 相关的预后因素。双侧检验, $P < 0.05$ 差异有统计学意义。

2 结果

278 例中位年龄 69.9 (63 ~ 77) 岁。BMI 中位数 24.61 (22.73 ~ 26.65)。TPSA 中位数 10.26 (6.95 ~ 19.08) ng/ml。pT2a ~ 2c 178 例, pT3a ~ 3b 91 例, pT4 9 例。国际泌尿病理协会 (International Society of Urological Pathology, ISUP) 分级 1 ~ 5 级分别为 57、70、52、41、58 例。切缘阳性 90 例。共 86 例 (30.9%) 发生 BCR (BCR 组), 余 192 例未发生 BCR (无 BCR 组)。中位无生化复发生存期 (biochemical recurrence-free survival, BRFS) 为 57.7 月。

基于 bp-MRI 的 T2WI 和 ADC 图各获得 444 个影像组学特征,共 888 个特征,特征分类及计数见表 1。利用 LASSO 回归从 888 个 MRI 影像组学特征中选择关键的预后特征,最终筛选出 6 个非零系数影像组学特征及其含义如下^[13]: ①original_shape_Maximum2DDiameterRow. T2 (T2 - 形态特征): 反映 ROI 的最大直径; ②original_firstorder_Minimum. T2 (T2 - 一阶统计量特征): 反映最小灰度强度; ③

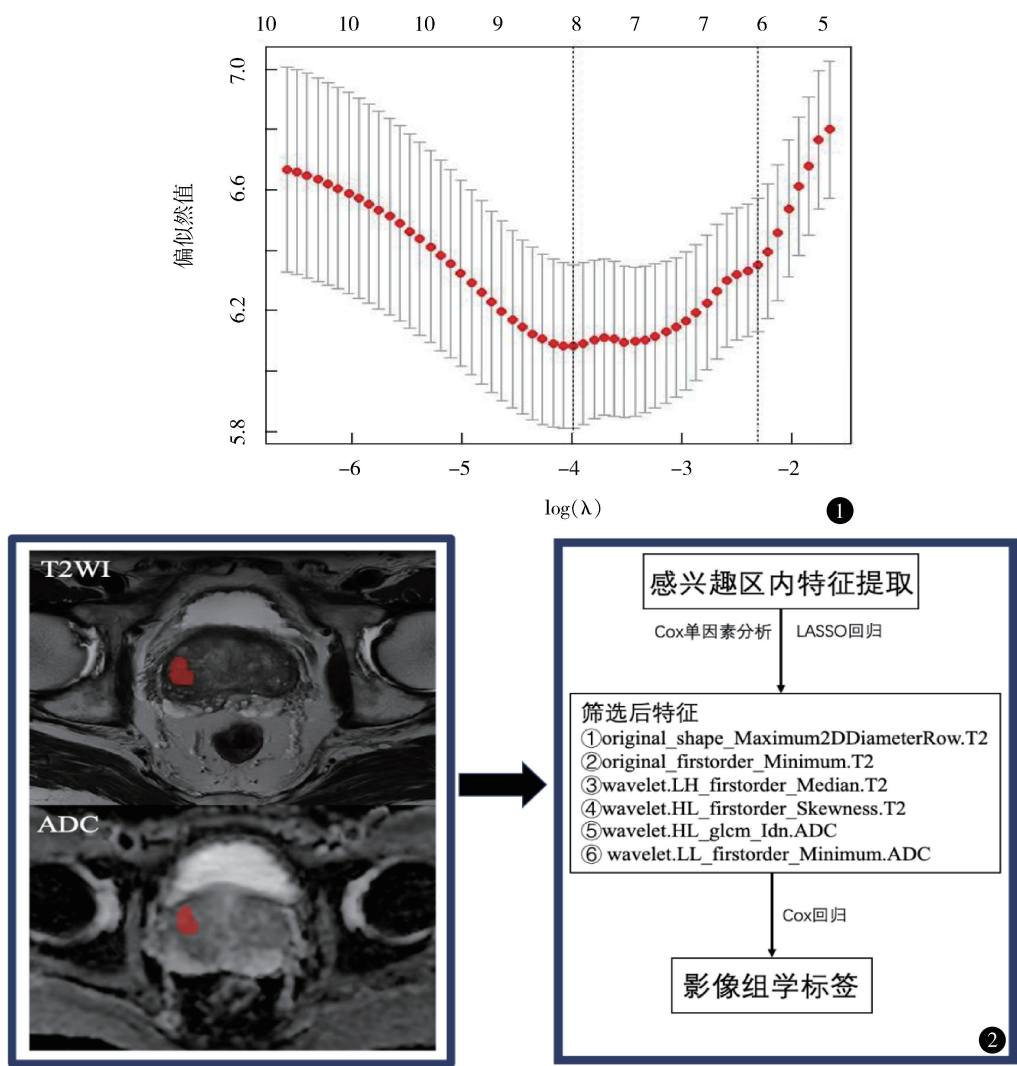


图 1 LASSO 回归筛选影像组学特征示例图 图 2 影像组学工作流程图

wavelet. LH_firstorder_Median. T2 (T2 - 小波 + 一阶统计量特征 - 中位数): 反映小波转换后中位灰度强度; ④ wavelet. HL_firstorder_Skewness. T2 (T2 - 小波 + 一阶统计量特征 - 偏度): 反映小波转换后图像灰度的偏度; ⑤ wavelet. HL_glcmln. ADC (ADC - 小

波 + 灰度共生矩阵特征): 反映小波转换后灰度的空间相关特性; ⑥ wavelet. LL_firstorder_Minimum. ADC (ADC - 小波 + 一阶统计量特征): 反映小波转换后最小灰度强度。

采用 Cox 回归分析年龄、BMI、TPSA、pT 分期、活检 ISUP 分级、切缘、cT 分期和影像组学标签与 BCR 的关系。患者被分为 3 个年龄组: 年轻组 (<60 岁)、老年组 (60 ~ 80 岁) 和高龄组 (>80 岁)。根据世界卫生组织对中国人的标准, BMI 分为低组 (<18.5)、中组 (18.5 ~ 23.9)、高组 (>23.9 ~ 27.9) 或极高组 (>27.9)。治疗前 TPSA 分为低组 (<4 ng/ml)、中组 (4 ~ 10 ng/ml)、高组 (>10 ~ 20 ng/ml) 或极高组 (>20 ng/ml)。首先, 我们分析临床病理指标与 BCR 的关系, 考虑到影像组学标签在 Cox 回归分析中可

表 1 影像组学特征分类及计数

特征分类	n
一阶统计量特征 (first order statistics)	18
形态特征 (shape)	14
灰度共生矩阵 (gray-level co-occurrence matrix, GLCM)	22
灰度游程矩阵 (gray-level run length matrix, GLRLM)	16
灰度级带矩阵 (gray-level size zone matrix, GLSZM)	16
灰度依赖矩阵 (gray level dependence matrix, GLDM)	14
小波 (wavelets)	344
合计	444

能对上述指标的显著性产生影响,本研究首先对临床病理指标进行单因素及多因素分析。单因素分析结果显示,TPSA、pT 分期、ISUP 分级和手术切缘在 BCR 组和无 BCR 组存在显著差异($P < 0.05$,表 2)。多因素 Cox 回归分析显示 ISUP 分级是 BCR 的独立

预后因素(表 3)。研究分析影像组学标签与 BCR 的关系,我们将单因素分析 $P < 0.05$ 的临床指标与影像组学标签进行多因素 Cox 回归分析,结果显示 ISUP 分级及影像组学标签是 BCR 的独立预后因素(表 4)。

表 2 RP 后 BCR 临床指标单因素 Cox 回归分析

因素	BCR 组($n = 86$)	无 BCR 组($n = 192$)	HR 值	95% CI	P 值
年龄(岁)			0.664	0.342 ~ 1.291	0.227
< 60	8	14			
60 ~ 80	73	164			
> 80	5	14			
BMI			1.341	0.960 ~ 1.874	0.085
< 18.5	1	4			
18.5 ~ 23.9	34	69			
> 23.9 ~ 27.9	37	94			
> 27.9	14	25			
TPSA(ng/ml)			1.471	1.116 ~ 1.938	0.004
< 4	6	18			
4 ~ 10	29	82			
> 10 ~ 20	21	57			
> 20	30	35			
pT 分期			1.513	1.101 ~ 2.079	0.011
2a ~ 2c	47	131			
3a ~ 3b	35	56			
4	4	5			
ISUP 分级			1.682	1.165 ~ 1.639	0.000
1 级	12	45			
2 级	16	54			
3 级	17	35			
4 级	15	26			
5 级	26	32			
切缘			1.658	1.020 ~ 2.697	0.041
阴性	50	50			
阳性	36	138			
cT 分期			1.938	1.221 ~ 3.077	0.051
2a ~ 2c	26	84			
3a ~ 3b	54	105			
4	6	3			

TPSA:总前列腺特异性抗原;ISUP:国际泌尿病理协会;HR:风险比

表 3 RP 后 BCR 临床指标多因素 Cox 回归分析

因素	β 值	标准误	Wald 值	HR 值	95% CI	P 值
TPSA(ng/ml)	0.211	0.124	2.878	1.246	0.938 ~ 1.655	0.128
pT 分期	0.052	0.168	0.097	1.162	0.795 ~ 1.699	0.439
ISUP 分级	0.191	0.088	4.712	1.277	1.059 ~ 1.540	0.011
切缘	0.307	0.233	1.735	1.214	0.714 ~ 2.067	0.474

TPSA:总前列腺特异性抗原;ISUP:国际泌尿病理协会;HR:风险比

表 4 RP 后 BCR 临床指标与影像组学标签的多因素 Cox 回归分析

因素	β 值	标准误	Wald 值	HR 值	95% CI	P 值
TPSA (ng/ml)	0.195	0.123	2.518	1.333	1.021 ~ 1.739	0.452
pT 分期	-0.012	0.178	0.004	0.920	0.548 ~ 1.547	0.756
ISUP 分级	0.162	0.090	3.272	1.235	1.027 ~ 1.486	0.025
切缘	0.292	0.232	1.584	1.156	0.690 ~ 1.937	0.582
影像组学标签	0.415	0.225	3.402	2.404	1.543 ~ 3.747	0.000

TPSA:总前列腺特异性抗原;ISUP:国际泌尿病理协会;HR:风险比

3 讨论

BCR 是 RP 治疗后发生局部复发和远处转移的先兆。早期精确识别 BCR 高风险患者并加以干预可能会改善患者预后。目前,已有多项研究基于传统的临床指标,如 TPSA、Gleason 评分、T 分期、穿刺阳性针数百分比等评估前列腺癌患者手术后的 BCR 风险^[7-9]。临床实践中 T2WI 和 ADC 是诊断前列腺癌最常用的 2 个序列,因此,本研究基于单中心 278 例前列腺癌的临床、影像及病理资料,以术后病理切片为参考,在 MRI 的 T2WI 序列及 ADC 上手工勾画癌灶,提取并筛选出与 RP 治疗后 BCR 相关的影像组学特征,初步探讨影像组学标签在前列腺癌患者接受 RP 治疗后的预后评估中的价值。考虑到影像组学标签在 Cox 回归分析中可能对临床病理指标的显著性产生影响,本研究首先对可能影响 RP 后 BCR 的临床病理指标进行单因素及多因素分析,然后将单因素分析 $P < 0.05$ 的临床指标与影像组学标签进行多因素 Cox 回归分析。单因素分析显示 BCR 组和无 BCR 组在 TPSA、pT 分期、ISUP 分级和切缘存在显著性差异 ($P < 0.05$),与既往多项研究^[12,13]结果一致。在既往研究中,研究者通过临床病理指标建立多种预测模型可辅助临床医师识别 BCR 高风险患者。但上述模型的建立均基于欧美前列腺癌患者的数据,在中国前列腺癌人群中的预测价值有限^[10,11]。另外,本研究通过多因素分析初步探索 MRI 影像组学标签与 BCR 的关系,结果显示影像组学标签是 RP 后 BCR 的独立危险因素。

影像组学通过从医学影像图像中高通量提出大量数字化影像组学量化特征,结合机器学习算法,深度挖掘代表生物学信息的影像组学标签,可用于疾病诊断及预后评估。影像组学在前列腺癌多个领

域,包括前列腺癌检出、临床显著性前列腺癌诊断、前列腺包膜外侵犯预测、Gleason 评分预测、骨转移及淋巴结转移评估等方面已有相应研究,但在 RP 术后预后评估方面的研究相对较少^[22-25]。

近年来,已有多项研究证实 MRI 影像组学特征在预测前列腺癌侵袭性及患者预后中的价值。Gnep 等^[24]共纳入 74 例行外放疗的外周带器官局限性前列腺癌,提取分析 MRI 的 T2WI 和 ADC 中的影像组学特征,结果显示 28 个 Haralick 特征和 4 个形态特征与外放疗后 BCR 显著相关,该研究建立的模型预测 BCR 的 C-index 为 0.9。Shiradkar 等^[25]纳入 120 例前列腺癌(110 例行根治性手术,10 例放疗),基于 MRI 的 T2WI 和 ADC 进行特征提取,通过 3 个特征筛选方法和 3 种机器学习算法共构建 9 个预测模型,其中最好的模型在训练集和验证集中的 C-index 分别为 0.84 和 0.73。Bourbonne 等^[26]研究影像组学特征对高危前列腺癌患者接受 RP 后 BCR 的预测价值,影像组学特征来自 MRI 的 T2WI 和 ADC,结果显示 1 个 ADC 特征与 BCR 显著相关 ($AUC = 0.79, HR = 17.9, P < 0.001$)。后续的外部验证研究进一步证实该特征的预测准确性及稳定性^[27]。Yan 等^[28]多中心研究基于 MRI 的 T2WI 进行特征提取和筛选,结合深度学习,最终选择 155 个影像组学特征用于模型的建立,该模型在训练集和外部验证集中预测 BCR 的 C-index 均为 0.801,具有良好的预测准确性及稳定性。本研究从 MRI T2WI 和 ADC 中共提取 888 个影像组学特征,经过筛选共获得 6 个影像组学特征。基于上述特征,应用 Cox 回归建立影像组学标签。多因素分析证实该影像组学标签是 BCR 的独立预后因素,这证实了影像组学特征在 RP 后 BCR 评估中的潜在价值。但由于本研究为单中心回顾性研究,纳入的样本量有限,

我们并未通过建立预测模型的方式进一步研究影像组学特征的对 BCR 的预测价值。

本研究的局限性主要体现在以下 3 个方面:①本研究为单中心回顾性研究,提取及筛选的影像组学特征是否具有稳定性仍需多中心前瞻性数据进行验证。②本研究只是对与 BCR 相关的影像组学标签进行初步探讨,如何将这些标签应用于临床从而实现不同患者 BCR 风险的精准评估尚需更加深入的研究。③影响 RP 后 BCR 的临床因素众多,本研究所纳入的临床因素为临床实践中最常用、最易获得的指标,其他因素如肿瘤体积、肿瘤最大径、脉管侵犯等指标未纳入。

综上所述,基于 MRI 影像组学标签与前列腺癌患者 RP 后 BCR 相关,有助于辅助临床医师对 BCR 风险进行评估。

致谢:感谢北京大学第三医院影像科何为教授和病理科陆敏教授团队在 MRI 癌灶勾画和病理标本处理上给予的指导和帮助。

参考文献

- Siegel RL, Miller KD, Fuchs HE, et al. Cancer statistics, 2022. *CA Cancer J Clin*, 2022, 72(1):7-33.
- Cao W, Chen HD, Yu YW, et al. Changing profiles of cancer burden worldwide and in China: a secondary analysis of the global cancer statistics 2020. *Chin Med J (Engl)*, 2021, 134(7):783-791.
- Rebello RJ, Oing C, Knudsen KE, et al. Prostate cancer. *Nat Rev Dis Primers*, 2021, 7(1):9.
- Van den Broeck T, van den Bergh RCN, Arfi N, et al. Prognostic value of biochemical recurrence following treatment with curative intent for prostate cancer: A systematic review. *Eur Urol*, 2019, 75(6):967-987.
- Devos G, Devlies W, De Meerleer G, et al. Neoadjuvant hormonal therapy before radical prostatectomy in high-risk prostate cancer. *Nature Rev Urol*, 2021, 18(12):739-762.
- Roach M, 3rd. Current trends for the use of androgen deprivation therapy in conjunction with radiotherapy for patients with unfavorable intermediate-risk, high-risk, localized, and locally advanced prostate cancer. *Cancer*, 2014, 120(11):1620-1629.
- Bratjbord JS, Leapman MS, Cooperberg MR. The CAPRA score at 10 years: Contemporary perspectives and analysis of supporting studies. *Eur Urol*, 2017, 71(5):705-709.
- Kattan MW, Eastham JA, Stapleton AM, et al. A preoperative nomogram for disease recurrence following radical prostatectomy for prostate cancer. *J Natl Cancer Inst*, 1998, 90(10):766-771.
- Zelic R, Garmo H, Zugna D, et al. Predicting prostate cancer death with different pretreatment risk stratification tools: A head-to-head comparison in a nationwide cohort study. *Eur Urol*, 2020, 78(1):E45-E47.
- Yeung VH, Chiu Y, Yu SS, et al. Are preoperative Kattan and Stephenson nomograms predicting biochemical recurrence after radical prostatectomy applicable in the Chinese population? *Sci World J*, 2013, 2013:506062.
- 王海峰,高旭,王燕,等. Kattan 列线图 and CAPRA 评分预测中国前列腺癌患者根治术后生化复发的效能验证. *中华泌尿外科杂志*, 2015, 36(4):285-289.
- Liesenfeld L, Kron M, Gschwend JE, et al. Prognostic factors for biochemical recurrence more than 10 years after radical prostatectomy. *J Urol*, 2017, 197(1):143-148.
- Ploussard G, Agamy MA, Alenda O, et al. Impact of positive surgical margins on prostate-specific antigen failure after radical prostatectomy in adjuvant treatment-naïve patients. *BJU Int*, 2011, 107(11):1748-1754.
- Limkin EJ, Sun R, Dercle L, et al. Promises and challenges for the implementation of computational medical imaging (radiomics) in oncology. *Ann Oncol*, 2017, 28(6):1191-1206.
- Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics. *J Nucl Med*, 2020, 61(4):488-495.
- Stabile A, Giganti F, Rosenkrantz AB, et al. Multiparametric MRI for prostate cancer diagnosis: current status and future directions. *Nat Rev Urol*, 2020, 17(1):41-61.
- Cookson MS, Aus G, Burnett AL, et al. Variation in the definition of biochemical recurrence in patients treated for localized prostate cancer: the American Urological Association prostate guidelines for localized prostate cancer update panel report and recommendations for a standard in the reporting of surgical outcomes. *J Urol*, 2007, 177(2):540-545.
- Turbey B, Rosenkrantz AB, Haider MA, et al. Prostate imaging reporting and data system version 2.1: 2019 Update of prostate imaging reporting and data system version 2. *Eur Urol*, 2019, 76(3):340-351.
- Shao L, Yan Y, Liu Z, et al. Radiologist-like artificial intelligence for grade group prediction of radical prostatectomy for reducing upgrading and downgrading from biopsy. *Theranostics*, 2020, 10(22):10200-10212.
- Yu Y, Tan Y, Xie C, et al. Development and validation of a preoperative magnetic resonance imaging radiomics-based signature to predict axillary lymph node metastasis and disease-free survival in patients with early-stage breast cancer. *JAMA New Open*, 2020, 3(12):e2028086.

21

Wu Q, Wang S, Li L, et al. Radiomics analysis of computed tomography helps predict poor prognostic outcome in COVID-19. *Theranostics*,2020,10(16):7231–7244.

22

Midiri F, Vernuccio F, Purpura P, et al. Multiparametric MRI and radiomics in prostate cancer: A review of the current literature. *Diagnostics (Basel)*,2021,11(10):1829.

23

Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics. *J Nucl Med*,2020,61(4):488–495.

24

Gnep K, Fargeas A, Gutierrez-Carvajal RE, et al. Haralick textural features on T2-weighted MRI are associated with biochemical recurrence following radiotherapy for peripheral zone prostate cancer. *J Magn Reson Imaging*,2017,45(1):103–117.

25

Shiradkar R, Ghose S, Jambor I, et al. Radiomic features from pretreatment biparametric MRI predict prostate cancer biochemical recurrence: Preliminary findings. *J Magn Reson Imaging*,2018,48

(6):1626–1636.

26

Bourbonne V, Vallieres M, Lucia F, et al. MRI-derived radiomics to guide post-operative management for high-risk prostate cancer. *Front Oncol*,2019,9:807.

27

Bourbonne V, Fournier G, Vallieres M, et al. External validation of an MRI-derived radiomics model to predict biochemical recurrence after surgery for high-risk prostate cancer. *Cancers*,2020,12(4):814.

28

Yan Y, Shao LZ, Liu ZY, et al. Deep learning with quantitative features of magnetic resonance images to predict biochemical recurrence of radical prostatectomy: A multi-center study. *Cancers*, 2021,13(12):3098.

(收稿日期:2022–11–05)

(修回日期:2023–04–03)

(责任编辑:李贺琼)