

• 临床研究 •

基于 MRI 影像组学、临床指标及 PI-RADS v2.1 评分构建前列腺癌包膜外侵犯的预测模型

胡稳, 黄刚, 姚伟根, 黄国来, 谢清

【摘要】目的 探讨基于磁共振成像(MRI)影像组学、临床指标及 PI-RADS v2.1 评分构建的融合模型预测前列腺癌包膜外侵犯(EPE)的可行性。**方法** 选择 2022 年 1 月至 2024 年 9 月余姚市人民医院收治的前列腺癌 EPE 患者 107 例。采用 Logistic 回归分析探究影响前列腺癌患者 EPE 发生的相关因素;通过 LASSO 回归分析提取 MRI 影像组学特征,构建影像组学模型;利用 Logistic 回归分析构建融合模型;受试者工作特征(ROC)曲线、校准曲线、临床决策曲线评价模型的预测效能;分析影像组学评分(Radscore)与临床特征及 PI-RADS v2.1 评分的相关性。**结果** 病灶横切面面积、病灶最大直径、前列腺体积、PI-RADS v2.1 评分、Gleason 评分升高,器官累及,癌细胞转移均是 EPE 的独立危险因素(均 $P < 0.05$)。共筛选出 6 个影像组学特征构建影像组学模型;临床特征模型、影像组学特征模型及 PI-RADS v2.1 评分对患者 EPE 发生情况均有较好的区分力,但融合模型的预测效能最高;Radscore 与临床特征、PI-RADS v2.1 评分呈正相关(均 $P < 0.05$)。**结论** MRI 影像组学、临床特征及 PI-RADS v2.1 评分构建融合模型能提高预测前列腺癌 EPE 的效能。

【关键词】 前列腺肿瘤;癌;包膜外侵犯;影像组学;临床指标;PI-RADS v2.1

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.03.012

【中图分类号】 R737.25 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-0800(2025)03-0264-05

区分器官局限性疾病和前列腺癌包膜外侵犯(extraprostatic extension, EPE)对前列腺癌患者的治疗至关重要^[1]。EPE 与生化复发^[2]、手术切缘阳性^[3]和转移性疾病^[4]的风险增加有关。前列腺癌 EPE 指肿瘤突破前列腺包膜,不再局限于前列腺内,甚至侵犯精囊等邻近组织结构^[5]。前列腺磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)检查已成为临床疑似前列腺癌患者的首要筛查方法^[6]。前列腺影像学报告和数据系统(prostate imaging reporting and data system, PI-RADS)是关于指南、标准化报告和数据完整体系,旨在提高前列腺癌的影像学诊断准确性和一致性^[7]。MRI 改善前列腺癌定位有助于局部治疗的研究,有研究将其作为低容量疾病患者全腺治疗的可能替代方法^[8]。尽管 MRI 技术取得了巨大进步,但由于仪器扫描参数及图像质量差异使 MRI 的应用仍然具有挑战性,即便结合最新的前列腺影像学报告和数据系统 2.1 (prostate imaging reporting

and data system version 2.1, PI-RADS v2.1)这种差异仍存在^[9-10]。本研究探究基于 MRI 影像组学、临床指标及 PI-RADS v2.1 评分构建前列腺癌 EPE 预测模型的可行性,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选择 2022 年 1 月至 2024 年 9 月余姚市人民医院收治的前列腺癌 EPE 患者 107 例,年龄 53 ~ 90 岁,平均(75.9±7.8)岁。另选同期 97 例经多参数 MRI 扫描确诊无 EPE 的前列腺癌患者作为对照组,年龄 50 ~ 90 岁,平均(76.4±9.0)岁。入组患者均行穿刺活检及多参数 MRI 检查。纳入标准:(1)患者年龄、前列腺体积、总前列腺特异性抗原(tPSA)、前列腺特异性抗原密度(PSAD)、游离前列腺特异性抗原(fPSA)、PI-RADS v2.1 评分、Gleason 评分等基线资料及 MRI 特征资料完整;(2)MRI 检查与根治性切除术时间差≤90 d;(3)MRI 图像上病灶可见且图像质量上不存在严重伪影;(4)病理结果于前列腺 MRI 检查后 6 周内获得。排除标准:(1)不能配合完成 MRI 检查者,(2)有前列腺切除治疗经历者,(3)合并其他恶性肿瘤患者。本研究获得余

基金项目: 余姚市科技计划项目(2023YZD02)

作者单位: 315400 浙江省余姚,余姚市人民医院

通信作者: 黄刚, Email: 9328150@qq.com

姚市人民医院医学伦理委员会批准,豁免/免除知情同意。

1.2 方法

1.2.1 检查方法 德国西门子 1.5 T 64 通道 MRI 扫描仪(Aera)完成扫描。18 通道相控阵线圈置于骨盆正上方结合 32 通道脊柱 Tim 线圈共同完成信号采集。常规 MRI 扫描序列包括 T₁ 加权成像(T₁WI)、T₂ 加权脂肪抑制成像(T₂WIFS)、扩散加权成像(DWI)。DWI 序列参数为:b 值=0、500、1 500、2 000,对应平均次数(Average)=1、1、4、22,重复时间(TR)=4 000 ms,回波时间(TE)=85 ms, 翻转角度(FA)=90°, 层厚=4 mm,扫描视野(FOV)=240 mm×240 mm,采集矩阵=180×180。

1.2.2 相关指标计算方法 前列腺体积=前后径_{max}×高径_{max}×横径_{max}×0.523; PSAD=tPSA/前列腺体积; f/tPSA=fPSA/tPSA^[7]。

1.2.3 图像分析提取 将原始前列腺图像导入 3DSlicer 软件,由 2 位在前列腺 MRI 诊断方面具有 10 年以上工作经验的影像科医师在未获得病理结果的情况下“双盲”阅片,以双参数序列评分方案^[11]为标准,对病例进行 PI-RADS v2.1 评分。再由两名医生单独手动对患者进行感兴趣区(ROI)勾画。意见不一致时,由 2 位医师进行协商讨论取得一致意见。将提取到的所有数据进行归一化处理,归一化处理后的数据,计算组内相关系数(ICC),留取 ICC 值不小于 80%特征。使用最小绝对收缩和选择算法(LASSO),通过 10 倍交叉验证筛选出最优特征,见图 1~2。

1.3 统计方法 通过 SPSS 23.0 统计软件进行数据分析,先采用 Kolmogorov-Smirnov 法检验数据分布,符合正态分布的计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用 t 检验;不符合正态分布的计量资料以 M(Q₁, Q₃)表示,采用非参数 Mann-Whitney U 检验;计数资料使用百分比(%)表示,采用 χ² 检验;影响因素分析采用多因素 Logistic 回归分析;将 ICC ≥ 0.8 的特征纳入 LASSO 回归分析进行降维,将筛选出的特征利用 Python3.7.0 通过逻辑回归分类器构建影像组学模型。将临床模型、影像组学模型、PI-RADS v2.1 评分预测患者前列腺癌 EPE 发生概率作为自变量纳入 Logistic 回归分析,构建融合模型;通过受试者工作特征(ROC)曲线、校准曲线和临床决策曲线

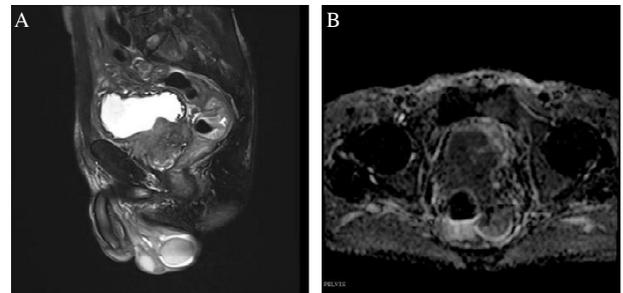
评价模型的预测效能。相关性分析采用 Spearman 相关性分析。P < 0.05 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组临床资料及 MRI 特征比较 EPE 组器官累及、转移占比高于非 EPE 组,病灶横切面最大面积、前列腺体积、PI-RADS v2.1 评分、Gleason 评分、病灶最大直径大于非 EPE 组, f/tPSA 低于非 EPE 组(均 P < 0.05),见表 1。

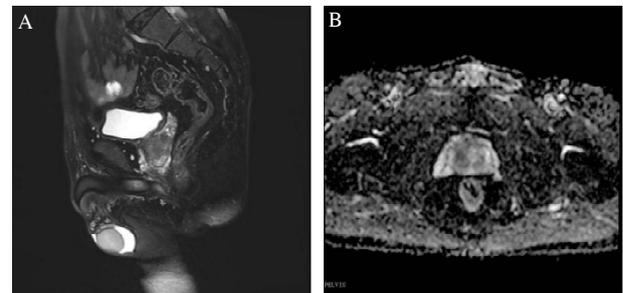
2.2 前列腺癌 EPE 的影响因素分析 将表 1 中差异有统计学的指标作为自变量,将患者是否有 EPE(非 EPE=0, EPE=1)作为因变量进行多因素 Logistic 回归分析。结果显示,前列腺癌出现器官累及、癌细胞转移、病灶横切面积增加、最大直径增加、前列腺体积增大、PI-RADS v2.1 评分升高、Gleason 评分升高是前列腺癌 EPE 的独立危险因素(均 P < 0.05),见表 2。构建的预测模型为 $P=1-1/(e^{-3.01+0.63 \times \text{累及情况}+0.76 \times \text{转移情况}+0.86 \times \text{病灶横切面最大面积}+0.70 \times \text{前列腺体积}+0.56 \times \text{PI-RADS v2.1 评分}+0.65 \times \text{Gleason 评分}+0.61 \times \text{病灶最大直径}})$ 。

2.3 影像组学特征筛选及差异性分析 本试验共得



注:男 64 岁, A 为 T₂ 矢状位,中央带及外周带分界不清,病灶形态不规则,呈团块状、低信号影,与邻近精腺、膀胱后壁分界不清; B 为表观弥散系数(ADC)图,病灶呈低信号,边界不清

图 1 前列腺癌伴包膜外侵犯



注:男 62 岁, A 为 T₂ 矢状位,病灶呈小结节状、稍低信号; B 为表观弥散系数(ADC)图,右侧外周带病灶呈低信号

图 2 前列腺癌非包膜外侵犯

到 6 个影像组学特征, 见图 3。采用逻辑回归模型建立影像组学模型, 并获得影像组学评分的公式: 影像组学评分 = $-0.41 + \sum_{i=1}^6 \alpha_i \times Fi$ 。根据 6 个最优特征及

对应加权系数, 构建影像组学标签 Radscore, 采用 Wilcoxon 检验, 两组 Radscore 差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 见图 4。

表 1 两组前列腺癌患者临床资料及 MRI 特征比较

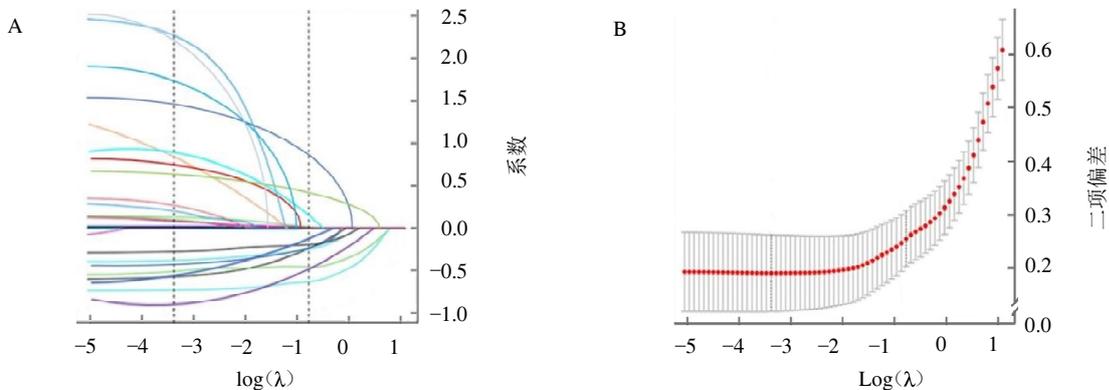
项目	EPE 组 (n=107)	非 EPE 组 (n=97)	$\chi^2(t)[Z]$ 值	P 值
年龄(岁)	75.9±7.8	76.4±8.9	(0.40)	> 0.05
累及情况[例(%)]				
累及包膜	107(100.00)	21(21.65)	133.61	< 0.05
累及精囊腺	88(82.24)	5(5.15)	121.89	< 0.05
累及膀胱	34(31.78)	0	36.99	< 0.05
累及直肠	14(13.08)	0	13.63	< 0.05
转移情况[例(%)]				
骨转移	54(50.47)	8(8.25)	42.87	< 0.05
淋巴结转移	44(41.12)	13(13.40)	19.42	< 0.05
病灶横切面最大面积(mm ²)	792(384, 1386)	425(225, 593)	[5.49]	< 0.05
tPSA(μg/L)	86.30(35.58, 171.31)	76.19(23.74, 141.11)	[1.54]	> 0.05
fPSA(μg/L)	12.08(5.14, 29.46)	12.77(5.38, 31.26)	[0.61]	> 0.05
f/tPSA	0.14(0.11, 0.20)	0.26(0.11, 0.36)	[9.59]	< 0.05
前列腺体积(cm ³)	41.50(30.10, 59.16)	33.05(25.81, 45.24)	[3.33]	< 0.05
PSAD(ng/ml ²)	1.77(0.83, 3.59)	1.85(0.76, 3.12)	[0.80]	> 0.05
PI-RADS v2.1 评分(分)	5(5, 5)	1(3, 4)	[13.38]	< 0.05
Gleason 评分(分)	8(7, 8)	4(3, 5)	[12.02]	< 0.05
病灶最大直径(cm)	3.30(2.20, 4.20)	1.85(0.76, 3.12)	[4.95]	< 0.05

注: EPE 为前列腺癌包膜外侵犯, MRI 为磁共振成像, tPSA 为总前列腺特异性抗原, fPSA 为游离前列腺特异性抗原, PSAD 为前列腺特异性抗原密度, PI-RADS 为影像学报告和数据分析系统

表 2 影响前列腺癌患者发生 EPE 的多因素 Logistic 回归分析

因素	β 值	SE 值	Wald χ^2 值	P 值	OR 值(95%CI)
累及情况	0.63	0.26	5.68	< 0.05	1.88(1.12 ~ 3.15)
转移情况	0.76	0.28	7.62	< 0.05	2.14(1.24 ~ 3.05)
病灶横切面最大面积	0.86	0.26	10.83	< 0.05	2.36(1.42 ~ 3.93)
f/tPSA	-0.16	0.15	1.14	> 0.05	0.86(0.53 ~ 1.63)
前列腺体积	0.70	0.30	5.30	< 0.05	2.02(1.67 ~ 2.99)
PI-RADS v2.1 评分	0.56	0.24	5.15	< 0.05	1.74(1.25 ~ 2.60)
Gleason 评分	0.65	0.25	6.61	< 0.05	1.92(1.17 ~ 3.16)
病灶最大直径	0.61	0.29	4.48	< 0.05	1.84(1.05 ~ 3.24)

注: EPE 为前列腺癌包膜外侵犯, tPSA 为总前列腺特异性抗原, fPSA 为游离前列腺特异性抗原, PI-RADS 为影像学报告和数据分析系统

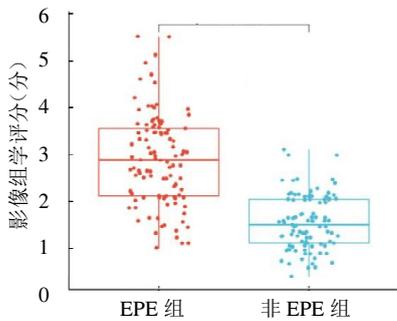


注: A 为系数分布图, 纵坐标表示模型中各特征的系数, 横坐标为 $\log(\lambda)$; B 为影像组学特征筛选图, 纵坐标为二项式偏差, 横坐标为 $\text{Log}(\lambda)$

图 3 LASSO 回归分析筛选变量结果

2.4 临床模型、影像组学模型、PI-RADS v2.1 评分及融合模型预测前列腺癌EPE的效能评价 将各模型预测前列腺癌患者EPE发生概率作为自变量纳入多因素 Logistic 回归分析,融合模型= $-7.16+2.59 \times$ 临床模型 $+2.99 \times$ 影像组学模型 $+5.74 \times$ PI-RADS v2.1 评分。ROC 曲线分析结果显示,临床模型、影像组学模型、PI-RADS v2.1 评分、融合模型均具有较高的区分度,且融合模型优于其余模型,见表3和图5A。校准曲线及决策曲线分析结果显示,融合模型的准确性最好且净收益更优,见图5B~C。

2.5 Radscore 与临床特征、PI-RADS v2.1 评分的关系 Radscore 与 Gleason 评分评分、PI-RADS v2.1 评分均呈正相关($r=0.57、0.88$, 均 $P < 0.05$)。



注:EPE 为前列腺癌包膜外侵犯,MRI 为磁共振成像
图4 两组 MRI 影像组学评分比较

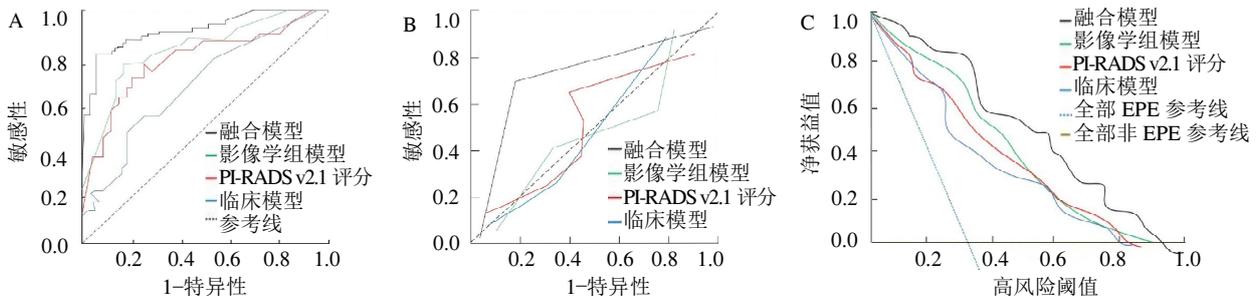
3 讨论

前列腺并无真正的包膜,仅含一层不完整的纤维外带,在后部和后外侧最明显,该纤维外带被称作前列腺“包膜”,是评估 EPE 的重要标志^[12]。EPE 会对周围组织产生影响,导致治疗难度增加、预后不良。EPE 亦与前列腺癌治疗方式有关,因此术前准确诊断 EPE 有助于对疾病进行准确的分级和分期,确定完善的手术方案。早期研究指出 MRI 诊断 EPE 的敏感度为 0.57^[13]。随着技术的不断成熟 MRI 诊断 EPE 的敏感度有所提高,双参数磁共振成像诊断 EPE 的准确度为 0.79,灵敏度为 0.79^[12]。有研究显示^[14]从 MRI 中提取放射组学特征,预测前列腺癌囊外扩展的 AUC 分别为 0.91(训练集)和 0.82(验证集)。本研究显示影像组学模型对 EPE 的诊断效能 AUC 为 0.86。这表明影像组学特征诊断 EPE 的效能稳定可靠。

PI-RADS v2.1 的开发是为了标准化多参数 MRI 对前列腺癌检测的解释,在 PI-RADS 评估中发现不同放射科医生解读结果之间存在显著差异^[15]。研究指出在前列腺癌 EPE 预测时训练集、测试集中 PI-RADS v2.1 评分的 AUC 分别 0.71 和 0.68^[16]。本研究中 PI-RADS v2.1 的 AUC 为 0.82,出现此种差异可能是由于读片医生经验不同。其他研究指出临床模型诊断 EPE 的 AUC 为 0.67,临床+双参数 MRI 特征模型诊断 EPE 的 AUC 为 0.84^[17]。本研究中临床模型的 AUC 为 0.71,而融合模型诊断 EPE 的 AUC

表3 临床模型、影像组学模型、PI-RADS v2.1 评分及融合模型预测效能评价

模型	AUC(95%CI)	准确度	灵敏度	特异度	EPE 预测值	非 EPE 预测值	F1 评分
临床模型	0.71(0.68 ~ 0.77)	0.75	0.80	0.77	0.70	0.70	0.56
PI-RADS v2.1 评分	0.82(0.74 ~ 0.91)	0.82	0.82	0.79	0.88	0.85	0.67
影像组学模型	0.86(0.80 ~ 0.93)	0.91	0.91	0.89	0.91	0.89	0.74
融合模型	0.94(0.89 ~ 0.99)	0.93	0.94	0.91	0.93	0.90	0.80



注:A 为临床模型、影像组学模型、PI-RADS v2.1 评分及融合模型的 ROC 曲线;B 为 4 种模型的校准曲线;C 为 4 种模型的临床决策曲线
图5 临床模型、影像组学模型、PI-RADS v2.1 评分及融合模型预测效能评价

为 0.94,显著提高了诊断效能。本研究还发现,Rad-score 与临床特征、PI-RADS v2.1 呈正相关。

本研究局限性:(1)未对构建的模型进行外部验证;(2)采用 MRI 引导穿刺进行活检,当肿瘤侵犯包膜外时,可能会导致穿刺难以准确捕获肿瘤组织。在未来的研究中将通过优化实验方法进一步验证,提高模型的临床实用性。

综上所述,基于 MRI 影像组学、临床特征及 PI-RADS v2.1 评分构建融合模型能提高预测前列腺癌 EPE 的效能,具有较高的临床可行性。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 胡稳:研究设计、数据采集整理、统计学分析;黄刚:数据采集整理、统计学分析、论文修改;姚伟根:研究设计、论文修改、经费支持;黄国来:研究设计、论文修改;谢清:数据采集整理、统计学分析

参 考 文 献

- [1] BANSAL U, ESTEVEZ A, BLACK J, et al. How can we identify extraprostatic extension (EPE) before surgery? The use of a preoperative prostate MRI EPE scoring system to assess postprostatectomy locally advanced prostate cancer[J]. *J Endourol*, 2024, 38(5): 499-504.
- [2] PARK S Y, JEON G Y. Assessment of diagnostic performance of risk factors affecting Extraprostatic Extension: Role of zonal level of prostate cancer[J]. *Curr Med Imaging*, 2024,20(1):9.
- [3] WANG J G, ZHONG C, ZHANG K C, et al. Imaging classification of prostate cancer with extracapsular extension and its impact on positive surgical margins after laparoscopic radical prostatectomy[J]. *Front Oncol*, 2024, 14: 1344050.
- [4] TERAMOTO Y, NUMBERE N, WANG Y, et al. The clinical significance of either extraprostatic extension or microscopic bladder neck invasion alone versus both in men with pT3a prostate cancer undergoing radical prostatectomy: A proposal for a new pT3a subclassification[J]. *Am J Surg Pathol*, 2022, 46(12): 1682-1687.
- [5] EASTHAM J A, BOORJIAN S A, KIRKBY E. Clinically localized prostate cancer: AUA/ASTRO guideline[J]. *J Urol*, 2022, 208(3): 505-507.
- [6] MOTTET N, VAN DEN BERGH R C N, BRIERS E, et al. EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG guidelines on prostate cancer-2020 update. part 1: Screening, diagnosis, and local treatment with curative intent[J]. *Eur Urol*, 2021, 79(2): 243-262.
- [7] 张若弟,周云舒,刘世莉,等.基于 Bp-MRI 的 PI-RADS v2.1 评分构建列线图预测 PSA(4-20ng/mL)前列腺癌的诊断价值[J].*磁共振成像*,2023,14(10):84-89.
- [8] CONNOR M J, GORIN M A, AHMED H U, et al. Focal therapy for localized prostate cancer in the era of routine multi-parametric MRI[J]. *Prostate Cancer Prostatic Dis*, 2020, 23(2): 232-243.
- [9] BREMBILLA G, DELL' OGLIO P, STABILE A, et al. Interreader variability in prostate MRI reporting using Prostate Imaging Reporting and Data System version 2.1[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(6): 3383-3392.
- [10] PARK K J, CHOI S H, LEE J S, et al. Interreader agreement with prostate imaging reporting and data system version 2 for prostate cancer detection: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Urol*, 2020, 204(4): 661-670.
- [11] DE VISSCHERE P, LUMEN N, OST P, et al. Dynamic contrast-enhanced imaging has limited added value over T2-weighted imaging and diffusion-weighted imaging when using PI-RADSV2 for diagnosis of clinically significant prostate cancer in patients with elevated PSA[J]. *Clin Radiol*, 2017, 72(1): 23-32.
- [12] 张虎,陶凌松,戴敏,等.临床-双参数 MRI 列线图诊断前列腺癌包膜外侵犯的价值[J].*中国肿瘤临床*,2024,51(14):722-727.
- [13] DE ROOIJ M, HAMOEN E H J, WITJES J A, et al. Accuracy of magnetic resonance imaging for local staging of prostate cancer: A diagnostic meta-analysis[J]. *Eur Urol*, 2016, 70(2): 233-245.
- [14] MA S, XIE H H, WANG H H, et al. Preoperative prediction of extracapsular extension: Radiomics signature based on magnetic resonance imaging to stage prostate cancer[J]. *Mol Imaging Biol*, 2020, 22(3): 711-721.
- [15] SINGH D, KUMAR V, DAS C J, et al. Machine learning-based analysis of a semi-automated PI-RADS v2.1 scoring for prostate cancer[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 961985.
- [16] 杨丽勤,金鹏飞,包婕,等.基于 MRI 的影像组学预测前列腺癌包膜外侵犯[J].*临床放射学杂志*,2023,42(5):789-795.
- [17] 周牧野,苏蕾,陈艾琪,等.双参数 MRI 联合临床特征预测前列腺癌包膜外侵犯的价值[J].*齐齐哈尔医学院学报*,2024,45(14): 1355-1359.

收稿日期:2024-12-27

(本文编辑:孙海儿)