❖综述

Research progresses of radiomics and artificial intelligence in bladder cancer

ZHOU Xiaofang[1,2]，LIU Qian[2*]，HONG Hua[2]，SUN Ran[2]，YUAN Jia[2]，SUN Yue[2]，ZHOU Jiaxuan[2,3]
(1. Graduate School，Baotou Medical College，Inner Mongolia University of Science and Technology，Baotou 014040，China；2. Department of Ultrasound Medicine，Inner Mongolia Autonomous Region People's Hospital，Hohhot 010017，China；3. Inner Mongolia Clinical Medical College of Inner Mongolia Medical University，Hohhot 010017，China)

[**Abstract**] Bladder cancer is a prevalent malignant tumor worldwide with a high recurrence rate. With the development of radiomics and artificial intelligence (AI)，relative applications in diagnosis and treatment of bladder cancer have been continuously expanded. The research progresses of radiomics and AI in bladder cancer were reviewed in this article.

[**Keywords**] urinary bladder neoplasms；radiomics；artificial intelligence
DOI：10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.031

影像组学及人工智能用于膀胱癌研究进展

周晓芳[1,2]，刘　倩[2*]，红　华[2]，孙　冉[2]，袁　嘉[2]，孙　跃[2]，周嘉轩[2,3]
(1.内蒙古科技大学包头医学院研究生院，内蒙古 包头　014040；2.内蒙古自治区人民医院超声医学科，内蒙古 呼和浩特　010017；3.内蒙古医科大学内蒙古临床医学院，内蒙古 呼和浩特　010017)

[**摘　要**] 膀胱癌是全球常见且易复发的恶性肿瘤。随着影像组学及人工智能技术的发展，其在膀胱癌诊疗中的应用不断拓展。本文就影像组学及人工智能用于膀胱癌研究进展进行综述。

[**关键词**] 膀胱肿瘤；影像组学；人工智能
[**中图分类号**] R737.14；R445　[**文献标识码**] A　[**文章编号**] 1003-3289(2026)03-0471-04

膀胱癌(bladder cancer，BCa)是全球第九大常见癌症，其在男性中的发病率远高于女性[1]。BCa 分期分级是选择治疗方案及预测预后的重要参考，提高早期诊断准确性具有重要临床意义。目前以膀胱镜活检病理或诊断性经尿道膀胱肿瘤电切术后病理为诊断 BCa 的金标准[2]，二者均属有创操作。近年来，影像组学及人工智能(artificial intelligence，AI)广泛用于诊断 BCa、评估分期分级和指导个体化治疗等[3-4]。本文就影像组学及 AI 用于 BCa 研究进展进行综述。

1　评估浸润深度

根据浸润深度可将 BCa 分为非肌层浸润性膀胱癌(non-muscular invasive bladder cancer，NMIBC)(≤T1 期)和肌层浸润性膀胱癌(muscular invasive bladder cancer，MIBC)(≥T2 期)。HU 等[5]于 BCa 双能量 CT 尿路造影 120 kVp-like 图、40 及 100 keV 虚拟单能量图(virtual monoenergetic image，VMI)和碘基材料分解图中分别提取 BCa 瘤体及瘤周影像组学特征，据此构建多层感知器(multi-layer perceptron，MLP)模型用于评估 BCa 肌层浸润状态，结果显示基于碘基材料分解图的瘤体＋瘤周联合模型表现最佳，其在测试集的受试者工作特征曲线下面积(area under the curve，AUC)为 0.881。LI 等[6]对比

[**基金项目**] 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFSH0023)、公立医院科研联合基金科技项目(2024GLLH0115)。
[**第一作者**] 周晓芳(2001—)，女，山东淄博人，在读硕士。研究方向：膀胱癌影像学及人工智能。E-mail：zhouxiaofang0120@126.com
[**通信作者**] 刘倩，内蒙古自治区人民医院超声医学科，010017。E-mail：18047192736@163.com
[**收稿日期**] 2025-05-20　[**修回日期**] 2025-11-14

基于 BCa T2WI 影像组学、单任务深度学习（deep learning，DL）和多任务 DL 模型术前预测 MIBC 的效能，发现测试集中多任务 DL 模型表现最佳（AUC 为 0.932），梯度加权类激活映射（gradient-weighted class activation mapping，Grad-CAM）显示该模型较单任务 DL 模型更关注病变组织区域、尤其病变边缘和关键部位，并可能为其预测 MIBC 更为准确的原因。

2　评估病理分级

WHO 2016 标准将 BCa 系统分为低恶性潜能乳头状尿路上皮肿瘤、低级别尿路上皮癌和高级别尿路上皮癌。对低级别肿瘤常行经尿道膀胱肿瘤切除术（transurethral resection of bladder tumor，TURBT），而对高级别肿瘤则推荐选择根治性膀胱切除术（radical cystectomy，RC）或新辅助化疗（neoadjuvant chemotherapy，NAC）等更积极的治疗策略[7]。既往部分研究[8-9]基于 BCa 术前超声图像提取影像组学特征构建影像组学评分联合临床特征模型或机器学习（machine learning，ML）模型，其预测 BCa 病理分级的 AUC 分别为 0.87 及 0.75，提示联合临床特征或能进一步提高模型预测效能及普适性。SONG 等[10]于 BCa 增强 CT（contrast-enhanced CT，CECT）中提取影像组学特征、利用 ResNet18 网络提取 DL 特征，并结合临床资料构建联合模型，发现联合模型术前预测 BCa 病理分级的效能显著优于单一临床模型或影像组学模型，认为可将其作为术前评估 BCa 及制定个体化治疗方案的实用工具。

3　评估淋巴结转移

淋巴结转移是 BCa 预后不良的主要因素之一，但术前仅依赖大小、形态等传统评估淋巴结方法易低估阳性率。WU 等[11]于 MR T2WI 中提取并筛选 BCa 影像组学特征，以之结合 MRI 报告中的淋巴结状态构建的列线图模型在训练集和验证集均展现出良好的校准和区分能力。GRESSER 等[12]针对 391 例接受 RC＋淋巴结清扫术的 BCa 患者先后手动勾画或利用 3D U-Net 模型自动勾画术前 CT 中的膀胱周围淋巴结、闭孔淋巴结及髂淋巴结 ROI 以构建影像组学模型，结果显示基于手动分割 ROI 所构建模型评估 BCa 淋巴结转移的 AUC 略高于医师评估结果（0.80 *vs.* 0.78），而自动分割模型的 AUC 仅 0.70。自动分割淋巴结技术目前尚不成熟，但具有广阔发展前景。

4　预测组织学变异

尿路上皮癌（urothelial carcinoma，UC）是 BCa 最常见组织学类型，占比高达 60%～90%，但其中约 20%可能发生组织学变异（histological variant，HV）。HV 通常与不良预后相关；不同 HV 状态肿瘤的治疗反应存在差异[13]。鳞状分化为 BCa 最常见 HV 类型，其次为腺样分化和神经内分泌分化[14]。EVRIMLER 等[15]基于 UC 术前 CECT 构建了 15 种 ML 模型，发现梯度提升和 CatBoost 模型预测训练集 HV 的效能最高（AUC 分别为 0.95 及 0.97，准确率分别为 90%及 85%），提示 ML 能较准确预测 UC HV、指导个体化治疗，但尚需通过大样本外部数据集全面评估模型性能和稳定性。HUANG 等[16]基于 38 例鳞状分化 UC 与 81 例不伴 HV 的 UC 构建的可自动选择特征、优化超参数的 MRI-ML 模型区分二者的 AUC 在训练集和测试集分别达 0.955 及 0.932，表明该模型用于术前预测 UC 鳞状分化具有一定潜力，为个体化管理 BCa 提供了有价值的非侵入性工具。

5　预测预后标志物表达

Ki-67 为细胞增殖抗原，其在 BCa 中呈高表达常与较高的 T 分期和肿瘤分级、淋巴结转移及淋巴管侵犯相关[17]。FAN 等[18]基于 BCa 多参数 MRI 所示瘤体和瘤周 5 mm 区域构建的影像组学模型预测 Ki-67 表达效能良好，其在训练集和测试集的 AUC 分别为 0.977 和 0.852；且肿瘤内部特征在该模型中占比较高，对于预测 Ki-67 表达价值更大。趋化因子 CXCL13 可与相应受体结合、通过调节免疫细胞迁移而影响肿瘤进展[19]。既往研究[20]发现 CXCL13 高表达是 BCa 预后良好的独立保护因素；基于 CECT 提取并筛选影像组学特征构建的逻辑回归模型能较准确地预测 BCa CXCL13 表达水平，为指导免疫治疗 BCa 提供参考。

6　指导 BCa 个体化治疗

6.1　NAC　NAC 后行 RC 联合盆腔淋巴结清扫术是治疗 MIBC 的常用手段，但可能引发白细胞下降、血小板降低、呕吐及食欲减退等不良反应[21]；提前识别 NAC 反应不佳个体并为其选择替代治疗方案十分重要。SUN 等[22]开发了 BCa AI 临床决策支持系统，之后由 17 名来自不同机构的不同学科（包括影像科、肿瘤科、泌尿外科等）医师利用该系统分析 BCa CT 尿路造影图像以评估 NAC 治疗反应，结果显示该系统对于“容易病例”的评估效能较高（AUC 为 0.88）而对“困难病例”的评估价值有限（AUC 为 0.67）；但总体而言，利用该系统辅助低年资医师可使其评估准确性基本达到高年资医师水平（平均 AUC 均为 0.77）。

6.2　免疫治疗　免疫治疗 BCa 为近年研究热点，但仅部分患者可从中受益[23]。卡介苗作为 NMIBC 标准辅助治疗的效果已得到广泛验证，但治疗后 2 年内

40%～60%病例存在肿瘤复发风险[24]。一项双中心研究[24]基于 CECT 影像组学特征、引入非负矩阵分解(nonnegative matrix factorization, NMF)进行无监督学习,其构建的影像组学模型预测 NMIBC 对于卡介苗免疫治疗反应的 AUC 在训练集及验证集分别为 0.79、0.68,为术前评估提供了新的方法。

6.3 放射治疗(放疗) 目前放疗用于 BCa 主要包括保留治疗 MIBC 的三联疗法(即 TURBT+化疗+放疗)及缓解晚期 BCa 症状(如出血、疼痛、尿路梗阻等)等[25]。CHUNG 等[26]收集 10 种肿瘤的单中心高质量临床放疗计划数据,利用 Varian RapidPlan 工具开发 KBP(knowledge-based planning)模型、通过 ML 生成剂量-体积直方图,结合脚本化计划结构和优化目标自动生成放疗计划;将其用于 BCa 验证集所生成的放疗计划目标体积平均剂量覆盖率达(99.2±0.4)%,放疗计划最大剂量为(105.7±1.0)%,且所有计划均被判定为"可接受,无需修改"或"可接受,但需小修改",展现出良好的临床应用潜力;但因该研究 BCa 样本量有限,模型的普适性及稳定性有待进一步验证。

7 小结与展望

影像组学及 AI 已在评估 BCa 浸润深度、判断其病理分级、评估预后标志物表达水平,分析有无淋巴结转移、HV,以及指导个体化治疗等方面展现出潜在应用价值。但现有研究多为单中心、回顾性观察,部分文献质量和方法学质量较低,存在一定偏倚[27];且基于神经网络的 DL 中的每个神经元和层的作用难以直观理解,模型决策过程不易解释。未来研究应致力于前瞻性、大样本、多中心高质量研究和多模态结合,通过合理处理缺失数据,评估模型过拟合、欠拟合或偏差等方法以提高研究质量;联合多模态信息充分挖掘和解析肿瘤相关信息,为精准诊断、个体化治疗 BCa 及预后评估提供更全面、准确的依据。随着技术进步和数据保护技术的提高,影像组学及 AI 将在提高医学自动化水平、减少人为错误、降低成本等方面发挥更大作用,推动精准医疗和预防性医疗。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:周晓芳查阅文献、撰写和修改文章;刘倩和红华指导、审阅文章、经费支持;孙冉、袁嘉、孙跃和周嘉轩查阅文献。

[参考文献]

[1] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2024,74(3):229-263.

[2] 中国肿瘤医院泌尿肿瘤协作组.膀胱癌早诊早治专家共识(2024年版)[J].中国癌症杂志,2024,34(6):607-618.

[3] CHEN M, DECARY M. Artificial intelligence in healthcare: An essential guide for health leaders[J]. Healthc Manage Forum, 2020,33(1):10-18.

[4] 施意,史浩男,叶翰嘉,等.深度学习在医学中的应用进展[J].中华检验医学杂志,2025,(2):292-296.

[5] HU M, ZHANG J, CHENG Q, et al. Multi-DECT image-based intratumoral and peritumoral radiomics for preoperative prediction of muscle invasion in bladder cancer[J]. Acad Radiol, 2025,32(1):287-297.

[6] LI J, QIU Z, CAO K, et al. Predicting muscle invasion in bladder cancer based on MRI: A comparison of radiomics, and single-task and multi-task deep learning[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2023,233:107466.

[7] DIAMANT E, ROUMIGUIÉ M, INGELS A, et al. Effectiveness of early radical cystectomy for high-risk non-muscle invasive bladder cancer[J]. Cancers (Basel), 2022,14(15):3797.

[8] 沈晓鹏.超声影像组学在预测膀胱癌病理分级中的临床应用研究[D].蚌埠:蚌埠医学院,2023:1-41.

[9] GAO R Z, WEN R, WEN D Y, et al. Radiomics analysis based on ultrasound images to distinguish the tumor stage and pathological grade of bladder cancer[J]. J Ultrasound Med, 2021,40(12):2685-2697.

[10] SONG H, YANG S, YU B, et al. CT-based deep learning radiomics nomogram for the prediction of pathological grade in bladder cancer: A multicenter study[J]. Cancer Imaging, 2023,23(1):89.

[11] WU S, ZHENG J, LI Y, et al. Development and validation of an MRI-based radiomics signature for the preoperative prediction of lymph node metastasis in bladder cancer[J]. EBioMedicine, 2018,34:76-84.

[12] GRESSER E, WOZNICKI P, MESSMER K, et al. Radiomics signature using manual versus automated segmentation for lymph node staging of bladder cancer[J]. Eur Urol Focus, 2023,9(1):145-153.

[13] EPAILLARD N, PARENT P, LORIOT Y, et al. Treatments outcomes in histological variants and non-urothelial bladder cancer: Results of a multicenter retrospective study[J]. Front Oncol, 2021,11:671969.

[14] NETTO G J, AMIN M B, BERNEY D M, et al. The 2022 world health organization classification of tumors of the urinary system and male genital organs-part B: Prostate and urinary tract tumors[J]. Eur Urol, 2022,82(5):469-482.

[15] EVRIMLER S, ALI GEDIK M, AHMET SEREL T, et al. Bladder urothelial carcinoma: Machine learning-based computed tomography radiomics for prediction of histological variant[J]. Acad Radiol, 2022,29(11):1682-1689.

[16] HUANG J, CHEN G, LIU H, et al. MRI-based automated machine learning model for preoperative identification of variant histology in muscle-invasive bladder carcinoma[J]. Eur Radiol, 2024,34(3):1804-1815.

[17] ZHENG Z, GU Z, XU F, et al. Magnetic resonance imaging-based radiomics signature for preoperative prediction of Ki67 expression in bladder cancer[J]. Cancer Imaging, 2021, 21(1):65.

[18] FAN X, YU H, NI X, et al. Systematic radiomics analysis based on multiparameter MRI to preoperatively predict the expression of Ki67 and histological grade in patients with bladder cancer[J]. Br J Radiol, 2023,96(1145):20221086.

[19] HUSSAIN M, LIU J, WANG G Z, et al. CXCL13 signaling in the tumor microenvironment[J]. Adv Exp Med Biol, 2021, 1302:71-90.

[20] CUI Y, YU L, MA G, et al. Construction of enhanced CT radiomics model for noninvasive prediction of CXCL13's expression and immune infiltrates in bladder cancer based on logistic regression and support vector machine algorithm[J]. Asian J Surg, 2023,46(12):5757-5758.

[21] van der HEIJDEN A G, BRUINS H M, CARRION A, et al. European Association of Urology Guidelines on muscle-invasive and metastatic bladder cancer: Summary of the 2025 guidelines[J]. Eur Urol, 2025,87(5):582-600.

[22] SUN D, HADJIISKI L, ALVA A, et al. Computerized decision support for bladder cancer treatment response assessment in CT urography: Effect on diagnostic accuracy in multi-institution multi-specialty study[J]. Tomography, 2022,8(2):644-656.

[23] 刘天遥,孙影,杨荣,等.免疫治疗时代下膀胱癌保膀胱治疗的研究进展[J].临床泌尿外科杂志,2024,39(3):246-253.

[24] YE L, CHEN Y, XU H, et al. Radiomics of contrast-enhanced computed tomography: A potential biomarker for pretreatment prediction of the response to bacillus calmette-guerin immunotherapy in non-muscle-invasive bladder cancer[J]. Front Cell Dev Biol, 2022,10:814388.

[25] ALFRED WITJES J, MAX BRUINS H, CARRIÓN A, et al. European Association of Urology Guidelines on muscle-invasive and metastatic bladder cancer: Summary of the 2023 guidelines[J]. Eur Urol, 2024,85(1):17-31.

[26] CHUNG C V, KHAN M S, OLANREWAJU A, et al. Knowledge-based planning for fully automated radiation therapy treatment planning of 10 different cancer sites[J]. Radiother Oncol, 2025,202:110609.

[27] HE C, XU H, YUAN E, et al. The accuracy and quality of image-based artificial intelligence for muscle-invasive bladder cancer prediction[J]. Insights Imaging, 2024,15(1):185.