

人工智能在前列腺癌中的应用研究进展

雷必秀¹, 李 卿²



1. 湘南学院临床学院 (湖南郴州 423000)
2. 湘南学院附属医院泌尿外科 (湖南郴州 423000)

【摘要】前列腺癌 (prostate cancer, PCa) 已成为我国男性泌尿生殖系统最高发的恶性肿瘤, 临床上受到了广泛关注。随着技术的进步和多学科合作的深入, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 逐渐在医疗领域展现出独有的优势和应用价值。为帮助临床医生更好地了解相关 AI 技术, 更精准高效地选择合适的 AI 算法模型, 本文简要介绍了 PCa 领域常用的 AI 技术, 综述近年来其在 PCa 的诊断、治疗、预后判断及早期筛查中的应用。

【关键词】前列腺癌; 人工智能; 诊断; 治疗; 预后; 筛查

Research progress of artificial intelligence in prostate cancer

LEI Bixiu¹, LI Qing²

1. School of Clinical Sciences, Xiangnan University, Chenzhou 423000, Hunan Province, China
 2. Department of Urology, Affiliated Hospital of Xiangnan University, Chenzhou 423000, Hunan Province, China
- Corresponding author: LI Qing, Email: tunfe6288460@163.com

【Abstract】 Prostate cancer (PCa) has become the most common malignant tumor in the male urogenital system in China, which has received extensive clinical attention. With the progress of technology and the deepening of multidisciplinary cooperation, artificial intelligence (AI) has gradually shown its unique advantages and application value in the medical field. In order to help clinicians better understand the relevant AI technology and select the appropriate AI algorithm model more accurately and efficiently, this article briefly introduces the commonly used AI technologies in the field of PCa, reviews its application in the diagnosis, treatment, prognosis and early screening of PCa in recent years.

【Keywords】 Prostate cancer; Artificial intelligence; Diagnosis; Treatment; Prognosis; Screening

前列腺癌 (prostate cancer, PCa) 是发生于前列腺的恶性肿瘤。2020 年国际癌症研究机构发布的全球癌症数据显示, PCa 的全球发病率仅次于肺癌, 居男性恶性肿瘤第二位^[1]。PCa 发病率随年龄增长而增长, 存在明显的地区差异。随着我国人口的快速老龄化, PCa 发病率已超过膀胱癌, 居我国男性泌尿生殖系统恶性肿瘤第一位,

且城市地区高于农村, 东部地区高于中西部^[2]。因此, 越来越多的临床医生关注 PCa 的早期筛查和诊疗, 希望能够尽早识别、诊断 PCa, 精准定位癌灶, 制定更符合患者实际的诊疗方案。

人工智能 (artificial intelligence, AI) 是用计算机模拟人类智能行为的科学技术, 如推理过程、学习过程、模式识别及环境适应等, 主

要研究领域有机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理等。目前, AI 的算法主要有机器学习 (machine learning, ML) 和深度学习 (deep learning, DL)。ML 是 AI 的核心, 分为监督学习、无监督学习和强化学习三种类型; DL 包括卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNN)、深度神经网络 (deep neural networks, DNN) 及循环神经网络 (recurrent neural networks, RNN) [3]。CNN 是 ML 中最具代表性的 DL 架构类型, 能够有效处理图像、视频等具有网格状拓扑结构的数据, 通过卷积操作自动提取空间层次特征, 无需前期的人工操作, 但对序列数据处理能力有限 [4]。RNN 适用于处理序列数据, 如文本、语音等, 能够捕捉时间序列上的依赖关系, 但难以处理长距离依赖 [5]。为弥补 RNN 的缺点, 出现了基于注意力机制的 Transformer 模型, 该模型并行化计算能力强, 适用于大规模数据处理。此外, 还有专门用于处理图结构数据的图神经网络 (graph neural networks, GNN), 用于图像分割任务的 U-Net 模型, 能够生成图像、音频等数据的生成对抗网络 (generative adversarial networks, GAN) [6]。随着技术的发展, 目前也出现了不少新的网络模型, 如视觉 Transformer、扩散模型、Perceiver 模型等, 这些新模型通常结合了现有模型的优点, 并针对特定任务进行优化, 以达到更好的性能和泛化能力。本文简要介绍了 PCa 领域常用的 AI 技术, 综述 AI 在 PCa 的诊断、治疗、预后及早期筛查中的应用, 并基于当前 AI 在医疗领域的应用现状和局限性, 探讨 AI 未来在临床实践中的发展方向。

1 AI在医疗领域中的应用

AI 自诞生以来, 与其他学科领域联系日益紧密, 英国利兹大学最早将 AI 与医学相结合, 在 1972 年研发了用于腹痛辅助诊断及手术相关需求的 AAP Help 系统 [7]。20 世纪 70 年代以来, 医学影像学技术取得了新的突破, 各种医学成像模式逐渐成熟, 医学图像识别成为了 AI 诊疗疾病的一个重要研究方向 [8]。影像组学是医学图像识别中的代表之一, 其基于患者的医疗影像资料, 通过必要的预处理和区域选择, 提取出图像中定量特征, 尤其是人类视觉不可感知的信息, 再进行特征选择去除多余信息, 经内部交叉验证或外部独立数据集验证后, 辅助医生对疾病进行诊断、

分级、预后评估和治疗反应监测 [9]。此外, AI 通过分析内窥镜图像对肿瘤进行病理学分级和侵袭性判断也是当前一大热点。Ali 等收集了四家医院泌尿外科共 216 个膀胱蓝光内窥镜图像, 将经 AI 分析得出的结果与高年资病理医师所得诊断进行对比, 发现 AI 对膀胱癌识别具有较高的分类敏感性和特异性 [10]。

AI 在泌尿外科辅助机器人手术和机器人操作培训中也有着广泛的应用, 它能更准确、客观地进行评估, 指导医生改进手术操作, 并预测患者的手术结果 [11]。在精准放射治疗、疾病分型分级治疗、个性化治疗等方面也常应用到 AI。尤其是基于 CNN 建立的自动学习模型, 能够为医生提供符合实际的个性化治疗方案作为参考, 提高治疗效率和质量, 为癌症患者带来更多选择。此外, 随着临床上对患者心理支持治疗的重视, AI 的自然语言处理技术也取得了重要进展, 目前可应用于问答系统、情感分析、专家系统等。徐文浩等认为使用这项技术与患者进行实时人机互动, 不仅能满足患者的情感需求, 还能收集碎片化信息, 发现医师易忽视的细节, 从而实现个性化诊疗, 更好地保障患者的身心健康 [12]。

2 AI在PCa中的应用

2.1 AI在PCa辅助诊断中的应用

目前临床上主要通过影像学检查及病理组织活检诊断 PCa。在影像学方面, 超声因无创、操作简单成为了临床上诊断 PCa 的常用工具之一, 如常规经直肠超声 (transrectal ultrasound, TRUS) 检查广泛应用于引导前列腺活检穿刺。但 PCa 病灶在超声图像上的表现特异性较差, 准确识别仍具有局限性, 漏诊率达 20%~40% [13]。为了更精准地识别 PCa, Li 等开发了一种分析 TRUS 图像的特征金字塔网络 (feature pyramid networks, FPN) 模型, 并与放射科医生判断结果进行比较, 发现其曲线下面积 (area under the curve, AUC)、特异度和灵敏度分别为 0.934、0.966 和 0.829, 表明该模型的 PCa 诊断性能优于放射科医生 [14]。也有学者先使用 AI 将前列腺超声图像自动分割, 以实现高效、精准的前列腺信息提取。肖志伟构建了一个 U 型的基于纯 Transformer (pure transformer, PT) 的 TRUS 图像分割网络 PT-UNet, 通过 Transformer 强大的自注意力机制,

精准识别并定位前列腺超声图像的全局特征,对比经典分割网络 U-Net 等 CNN 分割技术,发现 PT-UNet 分割技术可提高 TRUS 在 PCa 诊断中的临床意义^[15]。

磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 扫描是诊断 PCa 最灵敏的影像学技术, Norris 等的一项荟萃分析结果显示,多参数磁共振成像 (multi-parameters magnetic resonance images, mp-MRI) 检测 PCa 的特异度和灵敏度分别为 88% 和 74%^[16]。然而,一些良性疾病的图像与 PCa 图像相似,可能导致诊断过程的误判,从而造成不必要的前列腺活检。MRI 联合 AI 可进一步提高 PCa 诊断的准确性。Mehralivand 等设计了一种用于分析前列腺 MRI 图像的 AI 系统,该系统以 3D U-Net 模型和 AH-Net 模型为实验基础,并使用两组来源不同的影像和组织病理学数据进行常规模型训练,通过检验精度最佳的训练模型验证和测试,得出该系统在独立测试中检测 PCa 的灵敏度可达 63.0%~72.8%,能够从 mp-MRI 中提高读取 PCa 信息的性能^[17]。为便于医生了解大致诊断过程, Akamine 等将 ML 中的分层聚类 (hierarchical clustering, HC) 技术用于辅助 PCa 诊断,发现最佳的 HC 模型鉴别准确率在周围区域和过渡区域分别为 96.3% 和 97.8%,可以准确识别 PCa,符合现行临床标准^[18]。

Gleason 分级系统是一种在临床上被广泛采用的 PCa 组织学分级系统,因其能够较好地反映生物学行为和关联预后,现已成为临床医生制定 PCa 治疗方案的重要参考。但 Gleason 分级通常是由病理医生在显微镜下观察肿瘤细胞的组织学形态特征所得出,易受医生的主观因素影响,如个人经验、专业技能等,导致分级可重复性较差^[19]。Litjens 等首次尝试训练 DL 的 CNN 来检测前列腺穿刺活检中的肿瘤成分,并通过受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析发现中位 ROC 曲线下平均自举面积高达 0.99,说明该模型在 PCa 数字化 Gleason 分级中具有一定适用性^[20]。Ström 等开发了一个新型 PCa 检测、定位和 Gleason 分级的 AI 系统,将其分析阅片所得结果与 23 位经验丰富的泌尿病理学家所下诊断进行对比,发现 AI 在独立测试数据集上区分良性和恶性表现良好, AI 分析得出的癌症严重度与病理学家报告程度相近,且 Gleason

分级 AI 平均成对 kappa 值在病理学家的相应值范围内^[21]。

2.2 AI在PCa治疗中的应用

根治性前列腺切除术 (radical prostatectomy, RP) 是治疗 PCa 最有效的方法之一,主要方式有传统开放手术、腹腔镜手术等。随着腔镜技术和 AI 的发展,手术机器人在 PCa 治疗领域逐渐成熟和普及, AI 也成为了改进机器人辅助腹腔镜 RP 的重要工具。Yamada 等确定了手术机器人辅助 RP 失败的危险因素,并利用这些危险因素建立风险模型,经 739 名患者手术资料验证,得出 AI 可以用于优化机器人手术操作过程,帮助临床医生把握手术适应证和确定随访时间^[22]。程晓锋等认为 AI 辅助 RP 有利于术后疗效达到长期肿瘤控制、尿控恢复、术后切缘阴性、勃起功能保留、减少术后并发症的目标^[23]。手术机器人在临床上的普及也带动了辅助设备的发展。手术导航系统基于超声和 MRI 采集病灶和周围器官的二维图像,使用三维编辑技术重建目的图像,从而获得三维虚拟模型,用于制定个性化的手术方案,而 AI 和混合现实的加入实现了虚拟、现实和医生三者之间的信息互通^[24]。计算机可视化技术基于原有数据可以生成虚拟模型,投放于医生所处的视觉现实,并通过 AI 推荐最佳术式和智能决策,实现术前高度模拟手术^[25]。张宇辰通过搭建混合现实环境的术中导航和三维注册算法,使用手术机器人辅助治疗 PCa,发现 AI 和混合现实应用有利于实现操作精度要求高、手术复杂性大的外科手术,从而提高手术安全性和成功率^[26]。

对于局部进展期 PCa,根治性放射治疗可以达到近似治愈的效果,且剂量精准放射治疗可以更好地保护正常组织,减轻毒副作用^[27]。Hyer 等基于混合 DNN 和图形优化方法设计了一种自动图形分割技术,同时将自动分割出的图像与 3 名放射肿瘤学家独立勾勒出的病理轮廓进行比较,发现二者的前列腺轮廓 (中心到边缘距离) 平均偏差为 0.57 mm,且自动分割时间不到 26 s,该技术可以潜在地提高放疗规划范围的速度和可重复性^[28]。Tahri 等开展了一项多中心研究,构建了一种能够从各种 MRI 设备生成用于 PCa 放疗的合成 CT 通用 DL 模型,经过数据训练和测试,发现该模型可以在放疗中辅助前列腺剂量计划,做到剂量精准治疗^[29]。多数 DL 模型需要经过大量

数据的训练,随着高质量医学数据的积累,AI能够在更大程度上提高准确性,预期未来能够在放疗发展中发挥更重要的作用^[30]。

同时,现代医疗资源紧张、分配不均,罕见和高难度病例数据的积累也带动了专家系统的发展。在AI尚未普及时,大多算法或系统程序只是进行常规计算,此时的专家系统也只是一个用于执行复杂逻辑运算的任务系统。随着AI的普及和算法的不断创新,现在的专家系统可以通过一种知识表达模式将既往相关领域专家的临床经验存档,并基于信息匹配对患者的病情进行判断和治疗^[31]。即只需输入患者相关信息及后续检查数据,系统便可自动进行逻辑推理,利用库内固态条件和动态数据,模拟专家诊断疾病、开具处方药等行为。专家系统具有高度的针对性、透明性及灵活性,能够提供专家级别的决策,辅助临床医生做出更精确的诊断,补足人脑知识有限性、记忆容易出现模糊等缺点^[32]。

2.3 AI在PCa预后判断中的应用

预后是预测疾病经治疗后可能出现的病程和结局,能够反映疾病近期和远期疗效、转归恢复或进展程度,早期判断预后可以辅助临床医生制定治疗方案,改善患者生活质量。随着数字医疗的发展,被认为是PCa确诊及分型金标准的病理学检查也逐步数字化,具体表现在全视野数字切片(whole slide image, WSI)的出现,其利用数字载玻片扫描仪采集病理切片生成高分辨率数字图像,经计算机处理为全载玻片图像^[33]。基于6174张多中心独立机构的PCa WSI和Gleason评分对PCa复发的预测,Xiang等提出了一个弱监督的DL模型,其Gleason评分结果表现为高分级性能^[34]。Vazzano等测试了CADe系统对来自不同扫描仪和不同实验室标本WSI的PCa诊断性能,该系统识别敏感性为99.4%,特异性为97%,具有较高的诊断性和准确性^[35]。

由于前列腺病理检查样本常为随机抽样获得,故无法反映所有肿瘤病灶的异质性,而MRI能够清晰分辨前列腺和肿瘤组织,是临床中PCa检测的标准技术^[36]。MRI图像分析的结果多依赖于影像科医生的经验和主观判断,但与AI的联合应用不仅可以辅助PCa的诊断与治疗,还开拓了预后领域。Guerra等开展的一项荟萃分析结果显示,MRI已被纳入经典的前列腺分期列线图,

在检测PCa包膜外侵犯(extraprostatic extension, EPE)方面具有一定准确性,而EPE的识别对于治疗选择和康复计划至关重要^[37]。此外,MRI还可应用于PCa治疗后复发的预测。经RP治疗达到根治效果后,前列腺特异性抗原(prostate-specific antigen, PSA)水平连续两次超过 $0.2 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 则提示PCa复发,称为生化复发(biochemical recurrence, BCR)。Yan等基于DL建立高精度的BCR预测模型,使用来自3家医院经RP治疗的485名患者MRI资料进行模型验证,结果显示,该模型训练组和验证组的C指数均为0.802,其预测价值优于传统模型,有助于早期发现BCR风险较高的患者并予以医疗干预^[38]。

除常规的病理学和MRI检查,AI也能够与其他辅助检查联合用于疾病预后的判断。Jin等建立了一个基于凝血特征的列线图来预测PCa患者的无复发生存率,并在接受RP治疗的168例PCa患者中通过ROC曲线、Kaplan-Meier图和校准图进行验证,结果显示,模型组的1年AUC为0.74,3年AUC为0.69,诺模图模型表现出高度的判断准确性^[39]。Zhao等通过基因集富集分析选择BCR相关基因,构建了基于*CA14*、*LRAT*和*MGAT5B*表达水平的三基因风险评分(risk score, RS)模型,Kaplan-Meier图和ROC曲线的结果验证了RS模型的准确性,表明该模型可以预测PCa患者的预后^[40]。Hu等设计了一种纳入前列腺体积、⁶⁸Ga-前列腺特异性膜抗原(⁶⁸Ga-prostate specific membrane antigen, ⁶⁸Ga-PSMA)、正电子发射计算机断层扫描/X射线计算机断层成像(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)检查最大标准摄取值、体重指数、癌症阳性活检核心百分比及活检国际泌尿病理学会(International Society of Urological Pathology, ISUP)分级5个独立预测因子的列线图,其对验证组(AUC: 0.806)和对照组(AUC: 0.818)的PCa行RP预后,均显示出良好的诊断准确性^[41]。不同辅助检查的AI模型可以从多方面对PCa的预后进行预测,并提供准确的依据。

2.4 AI在PCa早期筛查中的应用

为减少疾病带来的负担,提高患者预后生活质量,我国越来越重视人群的疾病筛查,尤其是各种癌症。在PCa早期筛查方面,国家癌症中心

依据循证医学指南出版了 PCa 的早诊早治指南，各级医院积极建设包括 PCa 在内的“癌症筛查和早诊早治中心”，政府也在不断加强基层技术建设，尽早实现癌症筛查质量均一化^[42]。但由于中国人口基数大，筛查数据处理的规模庞大，故 AI 顺势应用于 PCa 的早期筛查，主要体现在风险评估和早期检测。Zhou 等基于 DL 中的交叉癌症学习和 DNA 修复途径的病理、分子相似性，发现 *ADIRF*、*SLC2A5*、*C3orf86*、*HSPA1B* 是最重要的 PCa 生物标志物，*VERNR2L1*、*EEPD1*、*TEPP* 和 *VNIR2* 是 PCa、乳腺癌和卵巢癌共同的重要生物标志物，还验证了这些生物标志物可以比任何 PCa 基因子集更好地预测疾病状态^[43]。医生基于体检者的这些生物标志物指标，不仅能判断 PCa 发生趋势，还能有效地将 PCa 病理组织与正常组织区分开。此外，还有学者将决策曲线分析^[44]、多层感知器^[45]等应用于 PCa 的风险评估。

血清 PSA 水平是 PCa 最经典的生物标志物。2022 年，国家癌症中心推荐 PSA 为 PCa 早期检测的首要方式，其临界值为 $4.0 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ ^[46]。Song 等使用收集到的 18 824 例前列腺活检数据开发了密集神经网络 DNN 和极端梯度提升 (extreme gradient boosting, XGBoost) 模型，该模型具有最小参数和缺失值处理算法，比较 AUC、PSA、PSA 密度、游离 PSA 和前列腺健康指数，发现四个数据集的验证中，DNN 模型 AUC 均 > 0.704 ，且均显著高于 PSA、PSA 密度、游离 PSA 和前列腺健康指数，表明 DNN 模型的性能与 XGBoost 模型相似，可用于早期预测 PCa^[47]。PCa 作为一种高度异质性的疾病，除生物标志物 PSA 外，有学者认为肿瘤供能的新生血管也可用于预测和辅助诊断。Karageorgos 等设计了一种 DL 模型代替人工在显微镜图像下分割血管和分析疾病进展，经两名专家验证，精确度、召回和骰子相似系数均表明模型图像分割效果较好，能够准确地检测和分割生成的血管，帮助临床提供额外的 PCa 生物学见解^[48]。

3 小结

本文综述了 AI 技术在 PCa 诊断、治疗、预后判断及早期筛查方面的应用，主要体现在三个方面：一是 AI 改变了传统的医学模式，可代替简单、繁琐、重复的工作，提高临床工作效率；

二是 AI 用于辅助诊疗能够减少临床主观判断误差，部分领域诊断精度甚至可以与行业专家媲美，显著提高治疗效益和医疗水平；三是 AI 可综合患者自入院后所有检查资料，实现患者个体化治疗，并能够基于算法模拟演练对不良转归风险的精准预测，建议手术预后措施。

AI 的效能依赖于大量高质量的训练数据，但 AI 的开放性易泄露个人和机构的隐私信息，尤其是在存储和传输数据过程中，数据可能被非法获取。这就要求更完善的数据收集和共享机制，建立大样本多模态的临床数据集，并通过加密技术、匿名化处理等手段，加强数据在收集、存储、传输和使用过程中的安全保护^[49]。此外，AI 具有输入数据和输出答案之间推理过程不可知的黑箱特质，导致其在医学领域面临可解释性的困境，而可解释性要求 AI 在输入和输出环节达到结果准确性的同时，解释从输入到输出之间的决策过程^[50]。相较于结果，医生也应注重医疗决策过程，以便解释诊疗机制，避免诊疗失误，尤其是在决策失败时。因此，这更需要医学、计算机科学、数据科学等多学科紧密合作，开发新的 AI 算法或改进现有算法，共同推进 AI 决策过程的清晰化。同时制定严格的标准化流程，明确医疗责任主体，健全医疗事故法律问责机制，树立智能医疗伦理观，确保患者安全。

尽管在伦理学方面，AI 技术的实施面临着数据隐私、算法透明度和解释性的挑战，但算法的不断创新优化和医疗设备技术的进步仍使得 AI 有着十分广阔的发展前景。在未来，AI 将不断提高医学影像分析水平，纳入更多 PCa 相关的基因组学、蛋白质组学和其他生物标志物数据，推进 PCa 的精准医疗。专家系统将进一步推进远程医疗和健康管理，提高医疗服务的效率和质量，及早发现疾病并进行治疗。AI 在医疗领域不断深入分析和挖掘数据，将有利于医生和研究人员发现新的疾病模式、治疗方法和早期筛查策略，进一步提高医疗水平和公共卫生水平。

参考文献

- 1 Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2021, 71(3): 209–249. DOI: 10.3322/caac.21660.
- 2 李星, 曾晓勇. 中国前列腺癌流行病学研究进展 [J].

- 肿瘤防治研究, 2021, 48(1): 98–102. [Li X, Zeng XY. Advances in epidemiology of prostate cancer in China[J]. Cancer Research on Prevention and Treatment, 2021, 48(1): 98–102.] DOI: [10.3971/j.issn.1000-8578.2021.20.0370](https://doi.org/10.3971/j.issn.1000-8578.2021.20.0370).
- 3 任靖文, 喻婷, 罗光恒, 等. MRI 联合人工智能在前列腺癌诊断中的应用进展 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2023, 21(3): 184–186. [Ren JW, Yu T, Luo GH, et al. Application progress of MRI combined with artificial intelligence in diagnosis of prostate cancer[J]. Chinese Journal of CT and MRI, 2023, 21(3): 184–186.] DOI: [10.3969/j.issn.1672-5131.2023.03.063](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5131.2023.03.063).
 - 4 张驰, 郭媛, 黎明. 人工神经网络模型发展及应用综述 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 57–69. [Zhang C, Guo Y, Li M. Review of development and application of artificial neural network models[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(11): 57–69.] DOI: [10.3778/j.issn.1002-8331.2102-0256](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.2102-0256).
 - 5 季长清, 高志勇, 秦静, 等. 基于卷积神经网络的图像分类算法综述 [J]. 计算机应用, 2022, 42(4): 1044–1049. [Ji CQ, Gao ZY, Qin J, et al. Review of image classification algorithms based on convolutional neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(4): 1044–1049.] DOI: [10.11772/j.issn.1001-9081.2021071273](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2021071273).
 - 6 张珂, 冯晓哈, 郭玉荣, 等. 图像分类的深度卷积神经网络模型综述 [J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(10): 2305–2325. [Zhang K, Feng XH, Guo YR, et al. Overview of deep convolutional neural networks for image classification[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(10): 2305–2325.] <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotol-ZGTB202110001.htm>.
 - 7 European Commission. Artificial intelligence in Europe: outlook for 2019 and beyond[EB/OL]. (2019-05-17). https://docslib.org/doc/8955391/artificial-intelligence-in-europe-outlook-for-2019-and-beyond#google_vignette.
 - 8 郑闪, 孙丰龙, 张慧娟, 等. 人工智能在肿瘤组织病理学的研究现状 [J]. 中华肿瘤杂志, 2018, 40(12): 885–889. [Zheng S, Sun FL, Zhang HJ, et al. Current applications of artificial intelligence in tumor histopathology[J]. Chinese Journal of Oncology, 2018, 40(12): 885–889.] DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-3766.2018.12.002](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-3766.2018.12.002).
 - 9 胡金玥, 白志明, 王刚, 等. 影像组学在前列腺癌诊治中的应用现状及展望 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2023, 21(12): 175–178. [Hu JY, Bai ZM, Wang G, et al. Application status and prospects of radiomics in the diagnosis and treatment of prostate cancer[J]. Chinese Journal of CT and MRI, 2023, 21(12): 175–178.] DOI: [10.3969/j.issn.1672-5131.2023.12.054](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5131.2023.12.054).
 - 10 Ali N, Bolenz C, Todenhöfer T, et al. Deep learning-based classification of blue light cystoscopy imaging during transurethral resection of bladder tumors[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 11629. DOI: [10.1038/s41598-021-91081-x](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91081-x).
 - 11 许克新, 丁泽华. 人工智能在功能泌尿外科的应用 [J]. 北京大学学报 (医学版), 2023, 55(5): 771–774. [Xu KX, Ding ZH. Application of artificial intelligence in functional urology[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2023, 55(5): 771–774.] DOI: [10.19723/j.issn.1671-167X.2023.05.001](https://doi.org/10.19723/j.issn.1671-167X.2023.05.001).
 - 12 徐文浩, 田熙, 艾合太木江·安外尔, 等. 人工智能在泌尿系统肿瘤中的应用研究进展 [J]. 中国癌症杂志, 2022, 32(1): 68–74. [Xu WH, Tian X, Aihetaimujiang A, et al. A systematic review of current advancements of artificial intelligence in genitourinary cancers[J]. China Oncology, 2022, 32(1): 68–74] DOI: [10.19401/j.cnki.1007-3639.2022.01.009](https://doi.org/10.19401/j.cnki.1007-3639.2022.01.009).
 - 13 梁晓秋, 曹玲玲, 陈溢旭. 经直肠超声造影引导前列腺穿刺活检诊断前列腺癌 [J]. 中国介入影像与治疗学, 2020, 17(2): 93–97. [Liang XQ, Cao LL, Chen YX. Contrast-enhanced transrectal ultrasonography in guiding prostate biopsy for diagnosis of prostate cancer[J]. Chinese Journal of Interventional Imaging and Therapy, 2020, 17(2): 93–97.] DOI: [10.13929/j.issn.1672-8475.2020.02.008](https://doi.org/10.13929/j.issn.1672-8475.2020.02.008).
 - 14 Li S, Ye X, Tian H, et al. An artificial intelligence model based on transrectal ultrasound images of biopsy needle tract tissues to differentiate prostate cancer[J]. Postgrad Med J, 2024, 100(1182): 228–236. DOI: [10.1093/postmj/qqad127](https://doi.org/10.1093/postmj/qqad127).
 - 15 肖志伟. 基于 Transformer 的经直肠超声图像分割技术研究 [D]. 广州: 广东技术师范大学, 2024. [Xiao ZW. Research on the technology about segmentation of transrectal ultrasound image based on transformer[D]. Guangzhou: Guangdong Polytechnic Normal University, 2024.] DOI: [10.27729/d.cnki.ggdjs.2023.000237](https://doi.org/10.27729/d.cnki.ggdjs.2023.000237).
 - 16 Norris JM, Kinnaird A, Margolis DJ, et al. Developments in MRI-targeted prostate biopsy[J]. Curr Opin Urol, 2020, 30(1): 1–8. DOI: [10.1097/MOU.0000000000000683](https://doi.org/10.1097/MOU.0000000000000683).
 - 17 Mehrlivand S, Yang D, Harmon SA, et al. Deep learning-

- based artificial intelligence for prostate cancer detection at biparametric MRI[J]. *Abdom Radiol(NY)*, 2022, 47(4): 1425–1434. DOI: [10.1007/s00261-022-03419-2](https://doi.org/10.1007/s00261-022-03419-2).
- 18 Akamine Y, Ueda Y, Ueno Y, et al. Application of hierarchical clustering to multi-parametric MR in prostate: differentiation of tumor and normal tissue with high accuracy[J]. *Magn Reson Imaging*, 2020, 74: 90–95. DOI: [10.1016/j.mri.2020.09.011](https://doi.org/10.1016/j.mri.2020.09.011).
- 19 许雨锶, 陈锐, 常易凡, 等. 人工智能在前列腺癌诊治及预后判断中的应用和展望[J]. *中华泌尿外科杂志*, 2023, 44(2): 152–156. [Xu YS, Chen R, Chang YF, et al. Application and prospect of artificial intelligence in diagnosis, treatment and prognosis of prostate cancer[J]. *Chinese Journal of Urology*, 2023, 44(2): 152–156.] DOI: [10.3760/cma.j.cn112330-20220930-00527](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112330-20220930-00527).
- 20 Litjens G, Sánchez CI, Timofeeva N, et al. Deep learning as a tool for increased accuracy and efficiency of histopathological diagnosis[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 26286. DOI: [10.1038/srep26286](https://doi.org/10.1038/srep26286).
- 21 Ström P, Kartasalo K, Olsson H, et al. Artificial intelligence for diagnosis and grading of prostate cancer in biopsies: a population-based, diagnostic study[J]. *Lancet Oncol*, 2020, 21(2): 222–232. DOI: [10.1016/S1470-2045\(19\)30738-7](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(19)30738-7).
- 22 Yamada Y, Fujii Y, Kakutani S, et al. Development of risk-score model in patients with negative surgical margin after robot-assisted radical prostatectomy[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 7607. DOI: [10.1038/s41598-024-58279-1](https://doi.org/10.1038/s41598-024-58279-1).
- 23 程晓锋, 王共先. 根治性前列腺切除术手术入路创新进展与加速康复外科[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2022, 3(6): 500–510. [Cheng XF, Wang GX. Innovative advances of surgical approach in radical prostatectomy and enhanced recovery after surgery[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2021, 3(6): 500–510.] DOI: [10.12180/j.issn.2096-7721.2022.06.011](https://doi.org/10.12180/j.issn.2096-7721.2022.06.011).
- 24 崔曦雯, 陈芳, 韩博轩, 等. 虚拟内窥镜图像增强膝关节镜手术导航系统[J]. *中国生物医学工程学报*, 2019, 38(5): 558–565. [Cui XW, Chen F, Han BX, et al. Image-guided arthroscopic surgery based on virtual endoscopic technology[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2019, 38(5): 558–565.] DOI: [10.3969/j.issn.0258-8021.2019.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-8021.2019.05.006).
- 25 方滢, 叶哲伟, 陈孝平. 科学技术对现代外科学发展的影响[J]. *临床外科杂志*, 2024, 32(1): 1–5. [Fang Y, Ye ZW, Chen XP. Effect of science and technology on the development of modern surgery[J]. *Journal of Clinical Surgery*, 2024, 32(1): 1–5.] DOI: [10.3969/j.issn.1005-6483.2024.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6483.2024.01.001).
- 26 张宇辰. 混合现实环境下的前列腺粒子植入机器人的手势交互研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023. [Zhang YC. Research on gesture interaction of prostate seed implantation robot in mixed reality environment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.] DOI: [10.27063/d.cnki.ghlg.2023.000194](https://doi.org/10.27063/d.cnki.ghlg.2023.000194).
- 27 张天宇, 李彩虹, 昌志刚, 等. 锥形束 CT 下膀胱充盈度对前列腺癌实际剂量分布影响[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2023, 21(5): 102–104. [Zhang TY, Li CH, Chang ZG, et al. Actual dose distribution of volumetric changes of bladder filling during prostate cancer radiotherapy by cone beam CT[J]. *Chinese Journal of CT and MRI*, 2023, 21(5): 102–104.] DOI: [10.3969/j.issn.1672-5131.2023.05.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5131.2023.05.035).
- 28 Hyer DE, Caster J, Smith B, et al. A technique to enable efficient adaptive radiation therapy: automated contouring of prostate and adjacent organs[J]. *Adv Radiat Oncol*, 2023, 9(1): 101336. DOI: [10.1016/j.adro.2023.101336](https://doi.org/10.1016/j.adro.2023.101336).
- 29 Tahri S, Texier B, Nunes JC, et al. A deep learning model to generate synthetic CT for prostate MR-only radiotherapy dose planning: a multicenter study[J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1279750. DOI: [10.3389/fonc.2023.1279750](https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1279750).
- 30 吴双, 周育夫. 人工智能在肿瘤放射治疗中的应用[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35(8): 161–166. [Wu S, Zhou YF. Application of artificial intelligence in tumor radiotherapy[J]. *China Medical Devices*, 2020, 35(8): 161–166.] DOI: [10.3969/j.issn.1674-1633.2020.08.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2020.08.041).
- 31 Simon G, DiNardo CD, Takahashi K, et al. Applying artificial intelligence to address the knowledge gaps in cancer care[J]. *Oncologist*, 2019, 24(6): 772–782. DOI: [10.1634/theoncologist.2018-0257](https://doi.org/10.1634/theoncologist.2018-0257).
- 32 苏海志, 李其锋, 李斌. 专家系统和大数据在职业病的应用分析思考[J]. *中国医疗器械信息*, 2021, 27(15): 29–30, 133. [Su HZ, Li QF, Li B. Analysis and reflection on the application of expert system and big data in occupational diseases[J]. *China Medical Device Information*, 2021, 27(15): 29–30, 133.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-6586.2021.15.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6586.2021.15.012).
- 33 Campanella G, Hanna MG, Geneslaw L, et al. Clinical-grade computational pathology using weakly supervised

- deep learning on whole slide images[J]. *Nat Med*, 2019, 25(8): 1301–1309. DOI: [10.1038/s41591-019-0508-1](https://doi.org/10.1038/s41591-019-0508-1).
- 34 Xiang J, Wang X, Wang X, et al. Automatic diagnosis and grading of prostate cancer with weakly supervised learning on whole slide images[J]. *Comput Biol Med*, 2023, 152: 106340. DOI: [10.1016/j.combiomed.2022.106340](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.106340).
- 35 Vazzano J, Johansson D, Hu K, et al. Evaluation of a computer-aided detection software for prostate cancer prediction: excellent diagnostic accuracy independent of preanalytical factors[J]. *Lab Invest*. 2023, 103(12): 100257. DOI: [10.1016/j.labinv.2023.100257](https://doi.org/10.1016/j.labinv.2023.100257).
- 36 朱学华, 邵立智, 刘振宇, 等. MRI 相关影像组学模型用于前列腺癌诊断、侵袭性和预后评估 (英文)[J]. *浙江大学学报 B 辑 (生物医学与生物技术) (英文版)*, 2023, 24(8): 663–682. [Zhu XH, Shao LZ, Liu ZY, et al. MRI-derived radiomics models for diagnosis, aggressiveness, and prognosis evaluation in prostate cancer[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology)*, 2023, 24(8): 663–682.] <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-ZDYW202308001.htm>.
- 37 Guerra A, Negrão E, Papanikolaou N, et al. Machine learning in predicting extracapsular extension (ECE) of prostate cancer with MRI: a protocol for a systematic literature review[J]. *BMJ Open*, 2022, 12(5): e052342. DOI: [10.1136/bmjopen-2021-052342](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-052342).
- 38 Yan Y, Shao L, Liu Z, et al. Deep learning with quantitative features of magnetic resonance images to predict biochemical recurrence of radical prostatectomy: a multi-center study[J]. *Cancers (Basel)*, 2021, 13(12): 3098. DOI: [10.3390/cancers13123098](https://doi.org/10.3390/cancers13123098).
- 39 Jin C, Bian Z, Mo F, et al. Establishment and validation of coagulation factor-based nomogram for predicting the recurrence-free survival of prostate cancer[J]. *Urol Int*, 2022, 106(9): 954–962. DOI: [10.1159/000519329](https://doi.org/10.1159/000519329).
- 40 Zhao Y, Tao Z, Li L, et al. Predicting biochemical-recurrence-free survival using a three-metabolic-gene risk score model in prostate cancer patients[J]. *BMC Cancer*, 2022, 22(1): 239. DOI: [10.1186/s12885-022-09331-8](https://doi.org/10.1186/s12885-022-09331-8).
- 41 Hu Q, Hong X, Xu L, et al. A nomogram for accurately predicting the pathological upgrading of prostate cancer, based on ⁶⁸Ga-PSMA PET/CT[J]. *Prostate*, 2022, 82(11): 1077–1087. DOI: [10.1002/pros.24358](https://doi.org/10.1002/pros.24358).
- 42 曹毛毛, 陈万青. 中国癌症筛查现状 [J]. *科技导报*, 2023, 41(18): 11–17. [Cao MM, Chen WQ. The status of cancer screening in China[J]. *Science and Technology Review*, 2023, 41(18): 11–17.] <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-KJDB202318003.htm>.
- 43 Zhou K, Arslanturk S, Craig DB, et al. Discovery of primary prostate cancer biomarkers using cross cancer learning[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 10433. DOI: [10.1038/s41598-021-89789-x](https://doi.org/10.1038/s41598-021-89789-x).
- 44 Deniffel D, Abraham N, Namdar K, et al. Using decision curve analysis to benchmark performance of a magnetic resonance imaging-based deep learning model for prostate cancer risk assessment[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(12): 6867–6876. DOI: [10.1007/s00330-020-07030-1](https://doi.org/10.1007/s00330-020-07030-1).
- 45 Dwivedi AK. Artificial neural network model for effective cancer classification using microarray gene expression data[J]. *Neural Comput Appl*, 2018, 29(12): 1545–1554. DOI: [10.1007/s00521-016-2701-1](https://doi.org/10.1007/s00521-016-2701-1).
- 46 赫捷, 陈万青, 李霓, 等. 中国前列腺癌筛查与早诊早治指南 (2022, 北京) [J]. *中国肿瘤*, 2022, 31(1): 1–30. [He J, Chen WQ, Li N, et al. China guideline for the screening and early detection of prostate cancer (2022, Beijing)[J]. *China Cancer*, 2022, 31(1): 1–30.] DOI: [10.11735/j.issn.1004-0242.2022.01.A001](https://doi.org/10.11735/j.issn.1004-0242.2022.01.A001).
- 47 Song SH, Kim H, Kim JK, et al. A smart, practical, deep learning-based clinical decision support tool for patients in the prostate-specific antigen gray zone: model development and validation[J]. *J Am Med Inform Assoc*, 2022, 29(11): 1949–1957. DOI: [10.1093/jamia/ocac141](https://doi.org/10.1093/jamia/ocac141).
- 48 Karageorgos GM, Cho S, McDonough E, et al. Deep learning-based automated pipeline for blood vessel detection and distribution analysis in multiplexed prostate cancer images[J]. *Front Bioinform*, 2024, 3: 1296667. DOI: [10.3389/fbinf.2023.1296667](https://doi.org/10.3389/fbinf.2023.1296667).
- 49 李骁, 孙志远, 张龙江. 影像人工智能在肺炎筛查、诊断及预测领域的应用研究进展 [J]. *山东大学学报 (医学版)*, 2023, 61(12): 13–20. [Li X, Sun ZY, Zhang LJ. Research advances of artificial intelligence-based medical imaging in the screening, diagnosis and prediction of pneumonia[J]. *Journal of Shandong University (Health Science)*, 2023, 61(12): 13–20.] DOI: [10.6040/j.issn.1671-7554.0.2023.0803](https://doi.org/10.6040/j.issn.1671-7554.0.2023.0803).
- 50 张姝艳, 皮婷婷. 医疗领域中人工智能应用的可解释

性困境与治理 [J]. 医学与哲学, 2023, 44(3): 25-29, 35.
[Zhang SY, Pi TT. Interpretability dilemma and governance
of artificial intelligence application in medical field[J].

Medicine and Philosophy, 2023, 44(3): 25-29, 35.] DOI:
[10.12014/j.issn.1002-0772.2023.03.06](https://doi.org/10.12014/j.issn.1002-0772.2023.03.06).

收稿日期: 2024 年 03 月 17 日 修回日期: 2024 年 05 月 16 日
本文编辑: 王雅馨 黄 笛

引用本文: 雷必秀, 李卿. 人工智能在前列腺癌中的应用研究进展[J]. 数理医药学杂志, 2024, 37(6): 453-461. DOI:
[10.12173/j.issn.1004-4337.202403093](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202403093).
Lei BX, Li Q. Research progress of artificial intelligence in prostate cancer[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2024, 37(6): 453-
461. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202403093](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202403093).