

前列腺癌骨转移的影像学诊断研究进展

王怡之*, 王佳强, 贾海云, 王胜利#

延安大学附属医院超声医学科, 陕西 延安

收稿日期: 2025年5月17日; 录用日期: 2025年6月11日; 发布日期: 2025年6月18日

摘要

前列腺癌是全球成年男性发病率最高的恶性肿瘤之一, 约70%的晚期患者都会发生骨转移, 从而导致一系列骨骼相关事件, 这降低了患者的生活质量并增加了死亡风险。因此, 前列腺癌及前列腺癌骨转移的早期诊断和预测至关重要, 这对协助临床医生判断病情和选择治疗方案有较高的临床意义。本文从前列腺癌骨转移发生的机制和影像学检查技术等方面进行总结, 重点介绍了单光子发射计算机断层显像、CT/X线、MRI扫描、正电子发射断层扫描/计算机断层扫描、超声及影像组学在前列腺癌骨转移早期诊断中的应用价值。

关键词

前列腺癌, 骨转移, 诊断

Research Progress in Imaging Diagnosis of Bone Metastasis of Prostate Cancer

Yizhi Wang*, Jiaqiang Wang, Haiyun Jia, Shengli Wang#

Department of Ultrasonography, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: May 17th, 2025; accepted: Jun. 11th, 2025; published: Jun. 18th, 2025

Abstract

Prostate cancer is one of the malignant tumors with the highest incidence among adult males in the world. About 70% of patients in advanced stage will have bone metastasis, which will lead to a series of bone-related events, which will reduce the quality of life of patients and increase the risk of death. Therefore, early diagnosis and prediction of prostate cancer and bone metastasis of prostate cancer are very important. It is of high clinical significance to assist clinicians to judge the condition and

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王怡之, 王佳强, 贾海云, 王胜利. 前列腺癌骨转移的影像学诊断研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(6): 1007-1014. DOI: 10.12677/acm.2025.1561818

choose the treatment plan. In this paper, the mechanism and imaging techniques of bone metastasis of prostate cancer are summarized, and the application values of single photon emission computed tomography, CT/X-ray, MRI scanning, positron emission tomography/computed tomography, ultrasound and imaging in the early diagnosis of bone metastasis of prostate cancer are emphatically introduced.

Keywords

Prostate Cancer, Bone Metastasis, Diagnose

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

前列腺癌(Prostate Cancer, PCa)是全球成年男性发病率最高的恶性肿瘤之一,约70%的晚期患者都会发生骨转移(Bone Metastasis, BM) [1],研究表明,局限性PCa患者的5年生存率高达99%,而转移性PCa患者的5年生存率仅为25% [2]。患有骨转移的患者容易受到骨骼相关事件的影响,包括无法忍受的骨痛、病理性骨折、高钙血症、神经压迫症状等,这大大降低了患者的生活质量并增加了死亡的风险[3]。迄今为止,检测骨转移最准确的方法仍是骨组织活检。但是,由于侵入性操作、低特异性,昂贵的成本和辐射暴露风险使该方法的临床应用受到限制,从而延误有效治疗进程。因此,对前列腺癌及前列腺癌骨转移的早期诊断和预测至关重要,对协助临床医生判断病情和选择治疗方案有较高的临床意义。本文将从前列腺癌骨转移发生的机制和影像学诊断检查技术等方面进行详细讨论。

2. 前列腺癌骨转移的发生机制

在前列腺癌发生早期,小簇发育不良的细胞仍然局限于原本正常的前列腺组织中。随着时间推移,这些恶性上皮细胞扩散到周围的前列腺基质内,形成侵袭性肿瘤。局部肿瘤进一步扩大并更具有侵袭性,开始向附近的结构中浸润,例如精囊和膀胱。新生血管为肿瘤进一步增大提供了营养基础,同时使肿瘤细胞更容易进入血液并向远处转移[4]。癌细胞通过识别某些特定受体更有效地附着在骨内皮上[5],在核因子 κ B配体、(RANKL)/RANK/OPG系统的调节下,定向吸引破骨前细胞并促使它们形成成熟破骨细胞来实现局部骨吸收。前列腺癌细胞还表达其他几种调节破骨细胞生成的体液因子,包括巨噬细胞集落刺激因子(M-CSF)、转化生长因子 β (TGF- β)超家族成员、PTHr等[6]。破骨细胞介导的骨吸收使肿瘤细胞有机会渗透到骨基质中并改变局部细胞因子环境,从而有利于骨形成,产生成骨细胞病变。此外,尿激酶型纤溶酶原激活剂(uPA)可以激发前列腺癌细胞和成骨细胞产生的IGF结合蛋白(IGFBP)释放活性胰岛素样生长因子1(IGF-1),导致IGF-R介导的成骨细胞和前列腺癌细胞增值[7]。此外,uPA还可激发潜伏性TGF β 1产生,在前列腺癌骨转移中发挥重要调节功能[8]。因此,与其他以溶骨性病变为特征的转移性肿瘤(如肺癌和乳腺癌)相比,PCa骨转移最初表现出溶骨性,最终转变为以成骨细胞为主。这解释了为什么在PCa骨转移病灶中出现成骨性和溶骨性并存的现象。

3. 前列腺癌骨转移的影像学检查

3.1. 单光子发射计算机断层显像

单光子发射计算机断层显像(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)是核医学技术的

一种, 它可将患者体内外的 γ 射线成像, 从而提供医疗诊断信息。SPECT 锝-99 (^{99m}Tc)-亚甲基二磷酸盐 (Methylene Diphosphonate, MDP) 全身骨显像是前列腺癌骨转移的首选筛查方式。因为前列腺癌骨转移大多是成骨性病变, 因此病变区域可呈现异常的放射性核素浓聚区, 但该方法的特异度较低, 存在假阳性可能。SPECT/CT 将 SPECT 与 CT 联合起来, 具有高度的图像融合精度, 通过连续采集解剖和功能信息, 相比单独 SPECT 图像进行诊断, SPECT/CT 能更好地区分良恶性骨病变信息, 提高诊断敏感度。Horger 等[9]人的一项涉及 47 名患者(包含 104 个病灶)的前瞻性研究显示, SPECT/CT 能够对 85% 的不确定平面闪烁显像骨病灶进行直接分类, 而单独使用 SPECT 时准确率仅为 36%。Helyar 等[10]进一步回顾性分析了 40 例接受 ^{99m}Tc -MDP 全身平面骨闪烁显像、SPECT 和 SPECT/CT 检查的前列腺癌患者, 研究者观察了平面闪烁显像和 SPECT 图像后, 将 61% 的病变评为模棱两可的病灶。而观察了 SPECT/CT 扫描图像后, 只有 8% 的病变被评为模棱两可, 24% 被评为恶性, 68% 被评为良性。目前, 还有通过 SPECT/CT 定量分析获得标准化摄取值(SUV)来诊断恶性肿瘤骨转移, 有研究[11]表明 $\text{SUV}_{\max} \geq 19.2$ 可以是鉴别前列腺癌骨转移病灶的最佳临界值, SPECT/CT 骨定量分析的准确度、特异度、阳性预测率和阴性预测率均高于常规 SPECT/CT 显像, 在前列腺癌骨转移灶的检出方面体现出了更大优势, 同时也能更早、更全面地评估肿瘤骨转移情况。

3.2. X 线平片和 CT

前列腺癌骨转移多为成骨性转移, 但 X 线平片对早期转移性骨肿瘤检测的灵敏度较低, 仅为 44%~50%。因此, 不建议 X 线作为前列腺癌骨转移的早期筛查手段。但是可以对怀疑存在骨质异常或存在相关临床症状的患者进行进一步确认, 判断骨质病变部位或者破坏程度, 并根据骨质破坏程度评价病理骨折的风险, 如果 50% 的骨皮质被病变破坏, 则表明病理性骨折的风险较高[12]。计算机断层扫描(CT)诊断骨转移的灵敏度范围为 71%~99% [13], 能够通过高分辨率成像清晰显示骨结构的形态学改变, 如骨质破坏、硬化性病变和溶骨性病变, 这些特征对骨转移的诊断具有重要提示作用。对于 SPECT 检测呈阳性但 X 线平片无异常, 并且存在局部症状或疑似骨转移且无法进行 MRI 检查的患者, 它能够清晰呈现骨质受损的具体范围及周围软组织肿块的情况, 从而有效评估骨转移瘤的存在及其对骨质的破坏程度。一项研究[14]表明, CT 与 X 线相比, 对骨转移的诊断效能提高了 26.8%。除此之外, 增强 CT 扫描能够清楚地观察骨转移瘤的血液供应状态及其与周围血管的关联, 进而评估脊柱转移瘤是否侵入了椎管区域。CT 在指导骨转移病灶的穿刺活检方面也具有显著优势, 其精准的定位能力可以保证穿刺活检的安全性和准确性, 以提高活检的成功率[15]。然而, CT 在早期骨转移的诊断中存在一定局限性, 它检测骨小梁间扩散的能力较低, 难以检测尚未引起明显骨质改变的早期病灶。因此, CT 通常与其他影像学检查联合使用, 例如骨扫描或正电子发射断层扫描, 以提高诊断的准确性。总之, CT 在前列腺癌骨转移的诊断中主要作为补充手段, 尤其在评估骨质结构改变和指导活检方面具有不可替代的作用。

3.3. MRI 扫描

磁共振成像(MRI)以其良好的骨骼和软组织分辨率在前列腺癌骨转移的诊断中拥有显著的优势, MRI 的 T1 加权像和 T2 加权像可以清晰显示骨髓内的异常信号, 能够有效鉴别在骨扫描中模棱两可的病变, 因此具有更高的灵敏度和特异性[16], 随着多通道线圈和台式扩展器的发展, 全身 MRI (Whole-Body MRI, WB-MRI) 的出现解决了 MRI 的视野有限和检查时间长的问题, WB-MRI 不但能够在一次检查中完成全身扫描, 还可以同时评估其他器官的转移情况, 为前列腺癌的分期提供更加全面的信息。Takahara 等[17] 2004 年首次将弥散加权成像(Diffusion-Weighted Imaging, DWI)用于对全身 MRI 检查, 并且提出了背景信号抑制技术(DWIBS), 这一技术能够通过抑制背景信号并突出恶性肿瘤的高信号。自此全身 MRI 就

成为前列腺癌及其他恶性肿瘤骨转移检测的常规方法。一项荟萃分析[18]表明,在前列腺癌骨转移的诊断方面,全身 MRI 的敏感度(94%)和特异度(99%)高于骨扫描的敏感度(80%)和特异度(95%),这说明全身 MRI 在检测前列腺癌骨转移和评估治疗方法方面比骨扫描更有效。Padhani 等人[19]制定了全身 MRI 扫描专家共识,并开发了前列腺癌转移报告和数据系统(METRADS-P),随着诊疗的标准化,现在也通过测量肿瘤体积和表观扩散系数(ADC)值计算肿瘤总扩散体积实现对病灶的精准定位和评估骨转移患者的治疗情况。

3.4. PET/CT 正电子发射断层扫描/计算机断层扫描

在过去的 20 年里,正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(PET/CT)在肿瘤学领域受到了极大的关注,它能够使用一些放射性核素追踪剂标记葡萄糖、氨基酸、蛋白受体等,从而显示相应组织的代谢活性。故而能够克服当前许多成像方法的限制使 PET 成为检测前列腺癌骨转移的有效工具。目前临床中使用较多的用于前列腺癌骨转移的放射性药物主要包括三类,肿瘤特异性药物(PSMA 放射性标记 ^{68}Ga 或 ^{18}F)、骨放射性示踪剂(^{18}F -NaF)和检测细胞增殖活性的放射性药物($^{11}\text{C}/^{18}\text{F}$ -胆碱)。

3.4.1. PSMA PET/CT

前列腺膜抗原(Prostate Specific Membrane Antigen, PSMA)是一种具有叶酸水解酶活性的 II 型跨膜蛋白,主要由前列腺上皮细胞产生[20]。研究表明,PSMA 的表达受雄激素的负调控,并且含量在前列腺癌及其转移灶中显著升高[21],PSMA PET/CT 能够减少做其他影像学检查的必要性和减免不必要的治疗。2020 年美国食品药品监督管理局(FDA)批准了首个 PSMA 靶向 PET 成像示踪剂 ^{68}Ga PSMA-11,大量研究证明了 ^{68}Ga -PSMA-11 PET/CT 在识别前列腺癌骨转移方面的能力[22]-[24],与骨扫描相比, ^{68}Ga -PSMA-11 PET/CT 在检测骨转移方面的灵敏度为 98%,特异度为 96.2%,其他研究还表明其诊断效能也高于 MRI [25]。2021 年上市了另一种示踪剂 ^{18}F ,研究者对两者进行对比后发现 ^{68}Ga -PSMA PET/CT 拥有更高的特异性、更低的假阳性率,并且除了检测骨转移外还能检测到软组织病变[26]。然而,需要注意的是,PSMA 不仅在肿瘤组织中表达,在某些非肿瘤组织中也有表达[27]。此外,PSMA 示踪剂也会在神经节中出现生理性摄取和骨骼中的非特异性摄取,这都可能导致假阳性结果,因此在解读 PSMA-PET 影像时需要考虑这方面的因素。

3.4.2. ^{18}F -NaF PET/CT

骨示踪剂 ^{18}F 通过回旋加速器产生,进入人体后 ^{18}F -NaF 会附着在新生骨周围,因而能够表示成骨细胞的活性,摄取机制和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP 相似。 ^{18}F -NaF PET/CT 通常用于评估原发或继发骨恶性肿瘤和监测治疗反应,一项回顾分析[28]表示, ^{18}F -NaF PET/CT 在检测前列腺癌患者的分期和骨转移方面表现出了优异的诊断性能,敏感度和特异度分别可达到 98%和 90%,比 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 骨扫描和 SPECT/CT 更高。Dyrberg 等人[29]认为, ^{18}F -NaF PET/CT 检测前列腺癌骨转移的准确性和 PSMA PET/CT 相当,并且两种模式都优于全身 MRI。一项评估在乳腺癌和前列腺癌患者中使用 PET/MRI 结合 ^{18}F -NaF 和 ^{18}F -FDG 放射性示踪剂情况的研究[30]表明,与使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP 的全身骨闪烁照相术相比,联合 ^{18}F -NaF 和 ^{18}F -FDG PET/MRI 检测到更多的骨转移,除此之外 PET/MRI 还具有识别骨外病变的能力。总的来说,虽然 ^{18}F -NaF PET/CT 不能完全取代 PSMA PET/CT,但其在骨转移高危患者的分期中优势较明显,同时,它可以作为一种补充检查手段,尤其是对于 PSMA 低表达的患者而言。

3.4.3. $^{11}\text{C}/^{18}\text{F}$ -胆碱 PET/CT

肿瘤组织对于细胞膜生物合成的胆碱有很高的需求,肿瘤细胞中胆碱激酶活性的增加进一步增强了对胆碱的需求,这共同导致肿瘤细胞对胆碱的摄取增加[31],因此胆碱 PET/CT 可以直接识别活动期肿

瘤。胆碱的放射性标记通常使用两种常见的放射性核素 ^{18}F 和 ^{11}C 来完成。 ^{11}C -胆碱和 ^{18}F -胆碱的主要区别在于它们各自的半衰期不同, ^{11}C -胆碱的半衰期约 20 分钟, ^{18}F -胆碱的半衰期约 110 分钟。此外, ^{18}F -胆碱的尿液排泄量相对高于 ^{11}C -胆碱。尽管它们的半衰期不同, 但两种示踪剂采用的成像技术保持相同。胆碱 PET/CT 用于检测骨转移的总体灵敏度和特异性分别为 87.0%和 99.0% [32], 这些数值低于 ^{68}Ga -PSMA 和 ^{18}F -NaF 扫描的数值, 但优于骨扫描和 SPECT。同时它还可以更早地定位骨髓中的转移病灶[33]。胆碱 PET/CT 的缺点是在低 PSA 水平下检测前列腺癌骨转移的灵敏度有限。

3.5. 超声检查

超声技术在前列腺癌原发病灶的筛查中应用广泛, 主要用于区分前列腺的良恶性病变。常规经腹超声因为腹腔软组织和气体的干扰对前列腺早期病变无法鉴别, 而经直肠超声能够避免其他因素干扰使前列腺内部结构显示得更清晰, 临床中也通过经直肠超声引导下的穿刺活检获取病理结果。近年来, 彩色多普勒超声和超声造影被用于评估和预测前列腺癌骨转移的发生。其理论依据是前列腺肿瘤在组织结构发生异常之前, 血流动力学已发生改变。肿瘤新生血管的形成是前列腺癌发展、侵袭及远处转移的关键, 也是肿瘤存活的基础。这些新生微血管结构紊乱, 缺乏平滑肌和完整的内皮细胞, 血流速度较慢, 但癌组织内的新生血管密度和数量却显著高于正常前列腺组织。因此, 肿瘤新生血管的形成、血流灌注及组织硬度的变化, 能够在一定程度上反映前列腺癌的侵袭能力。有研究发现骨转移组造影剂微泡到达峰值的强度(PI)和造影剂的灌注量及排空量大于非转移组[34], 说明通过超声造影表现, 也有利于我们对疾病做出正确判断。剪切波弹性成像(SWE)因为能够对组织硬度进行定量测量而被广泛用于对前列腺癌及骨转移的研究中, 龙玉屏[35]等人的研究结果表明, 骨转移患者的 SWE 参数显著高于非骨转移患者, 这可能是因为高侵袭性前列腺癌病灶的病理特征为融合的小腺泡群, 整体上属于低分化腺癌, 表现为实性片状、条索状等结构, 因此硬度更大, 发生骨转移的前列腺病灶一般浸润范围较大, 且组织更加致密, 除此之外, 更易发生骨转移的高风险前列腺癌内部常存在肉眼难以识别的致密点状微钙化, 这些微钙化也会使病灶硬度增加, 从而被 SWE 所识别[36]。

3.6. 影像组学在前列腺癌骨转移中的应用

医学成像和计算机分析技术的进步给肿瘤的评估带来了革命性的变化, 影像组学(Radiomics)能够从原始影像数据中提取高维特征, 并基于数据提取构建分析模型从而改善临床决策[37]。这类研究主要集中在利用多种成像模式(如 X 射线、超声、CT 和 MRI)的纹理特征, 结合 2D/3D 的形状特征、直方图特征和基于深度学习的特征量化肿瘤的异质性。研究的基本流程包括图像采集与分割、特征提取与降维、模型建立等, 常用的建模方法有, Logistic 回归(LR)、支持向量机(SVM)、随机森林(Random Forest)、COX 回归、深度学习方法等等, 不同建模方式有各自的优势和局限性, 在实际应用中要根据数据特点和临床问题选择合适方法。许多研究将影像组学用于前列腺相关研究, Bernatz 等人[38]采用了影像组学特征分析及多参数 MRI 来对前列腺癌进行分层研究, 有研究表明影像组学对前列腺癌骨转移有很好的预测效能[39], 可以通过挖掘病灶区域肉眼难以识别的纹理信息来反映肿瘤的生物行为, 例如 D L 算法则可通过多层网络结构提取肿瘤区域的抽象特征[40]。现在, 也有将影像组学与基因组学结合的研究, 有学者进行了一项 PCa mp-MRI 影像组学预测 Ki-67 表达和 Gleason 评分的多中心研究[41], 结果表明, 基于支持向量机(SVM)分类器的模型估计 Ki-67 表达状态的能力和基于 Lasso 分类器的模型评估高 GS 的能力可以增强临床决策。人工智能的兴起将推动影像基因组学在个性化医疗领域的深入发展, 通过结合基因组信息可以更精准地分析肿瘤的特征, 开辟新的医疗路径。

总而言之, 近年来各类影像学检查在 PCa 骨转移的诊断和预测方面都取得了很大的进展, 从传统的

骨扫描、X线、CT、MRI到PET/CT, 这些技术针对PCa骨转移的灵敏度、特异度和诊断准确性均有了显著提升。尤其是PET/CT和全身MRI的应用, 不仅提高了骨转移病灶的检出率, 还为临床医生做出精准决策提供了更加全面的信息。此外, 影像组学特征和人工智能的联合进一步推动了PCa骨转移的个性化诊疗, 高维特征提取和数据分析能够更精准地预测肿瘤的生物行为和治疗反应。未来, 随着多模态影像技术的深入发展, PCa骨转移的诊断将更加精准, 治疗方案也将更加个体化, 从而为患者带来更好的预后和生活质量。

基金项目

延安市科技计划项目(NO:2023-SFGG-085)。

参考文献

- [1] 李宁, 肖国有. 前列腺癌骨转移治疗的研究进展[J]. 肿瘤防治研究, 2020, 47(8): 641-646.
- [2] Huang, S., Kao, Y., Muller, C.J.F., Joubert, E. and Chuu, C. (2020) Aspalathin-Rich Green Aspalathus Linearis Extract Suppresses Migration and Invasion of Human Castration-Resistant Prostate Cancer Cells via Inhibition of YAP Signaling. *Phytomedicine*, **69**, Article ID: 153210. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2020.153210>
- [3] Xu, Y., Zhang, G., Liu, Y., Liu, Y., Tian, A., Che, J., et al. (2024) Molecular Mechanisms and Targeted Therapy for the Metastasis of Prostate Cancer to the Bones (Review). *International Journal of Oncology*, **65**, Article No. 104. <https://doi.org/10.3892/ijo.2024.5692>
- [4] Baldessari, C., Pipitone, S., Molinaro, E., Cerma, K., Fanelli, M., Nasso, C., et al. (2023) Bone Metastases and Health in Prostate Cancer: From Pathophysiology to Clinical Implications. *Cancers*, **15**, Article 1518. <https://doi.org/10.3390/cancers15051518>
- [5] Park, S.H., Keller, E.T. and Shiozawa, Y. (2017) Bone Marrow Microenvironment as a Regulator and Therapeutic Target for Prostate Cancer Bone Metastasis. *Calcified Tissue International*, **102**, 152-162. <https://doi.org/10.1007/s00223-017-0350-8>
- [6] Karim, F., Jun, Y., Sara, P., et al. (2003) Prostate Cancer Cells-Osteoblast Interaction Shifts Expression of Growth/Survival-Related Genes in Prostate Cancer and Reduces Expression of Osteoprotegerin in Osteoblasts. *Clinical Cancer Research: An Official Journal of the American Association for Cancer Research*, **9**, 2587-2597.
- [7] Huang, H., Qin, J., Wen, Z., Liu, Y., Chen, C., Wang, C., et al. (2024) Effects of Natural Extract Interventions in Prostate Cancer: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Phytomedicine*, **129**, Article ID: 155598. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2024.155598>
- [8] Koistinen, H., Kovanen, R., Hollenberg, M.D., Dufour, A., Radisky, E.S., Stenman, U., et al. (2023) The Roles of Proteases in Prostate Cancer. *IUBMB Life*, **75**, 493-513. <https://doi.org/10.1002/iub.2700>
- [9] Horger, M., Eschmann, S.M., Pfannenberger, C., Vonthein, R., Besenfelder, H., Claussen, C.D., et al. (2004) Evaluation of Combined Transmission and Emission Tomography for Classification of Skeletal Lesions. *American Journal of Roentgenology*, **183**, 655-669. <https://doi.org/10.2214/ajr.183.3.1830655>
- [10] Helyar, V., Mohan, H.K., Barwick, T., Livieratos, L., Gnanasegaran, G., Clarke, S.E.M., et al. (2009) The Added Value of Multislice SPECT/CT in Patients with Equivocal Bony Metastasis from Carcinoma of the Prostate. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **37**, 706-713. <https://doi.org/10.1007/s00259-009-1334-3>
- [11] 翟威豪, 何薇. SPECT/CT 骨定量 SUVmax 分析在老年前列腺癌骨转移中的鉴别诊断价值[J]. 分子影像学杂志, 2021, 44(6): 983-987.
- [12] Rybak, L.D. and Rosenthal, D.I. (2001) Radiological Imaging for the Diagnosis of Bone Metastases. *The Quarterly Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **45**, 53-64.
- [13] Yamaguchi, T. (2001) Intertrabecular Vertebral Metastases: Metastases Only Detectable on MR Imaging. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, **05**, 171-176. <https://doi.org/10.1055/s-2001-15676>
- [14] 白振明. CT对转移性骨肿瘤尤其是椎体转移的应用价值[J]. 国际医学放射学杂志, 1987(3): 176.
- [15] 中国抗癌协会癌症康复与姑息治疗专业委员会. 恶性肿瘤骨转移及骨相关疾病临床诊疗专家共识: 2014 版[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2014.
- [16] Tilki, D., van den Bergh, R.C.N., Briers, E., Van den Broeck, T., Brunckhorst, O., Darraugh, J., et al. (2024) EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG Guidelines on Prostate Cancer. Part II—2024 Update: Treatment of Relapsing and Metastatic Prostate Cancer. *European Urology*, **86**, 164-182. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2024.04.010>

- [17] Takahara, T., Imai, Y., Yamashita, T., *et al.* (2004) Diffusion Weighted Whole Body Imaging with Background Body Signal Suppression (DWIBS): Technical Improvement Using Free Breathing, STIR and High Resolution 3D Display. *Radiation Medicine*, **22**, 275-282.
- [18] Sun, G., Zhang, Y.X., Liu, F., *et al.* (2020) Whole-Body Magnetic Resonance Imaging Is Superior to Skeletal Scintigraphy for the Detection of Bone Metastatic Tumors: A Meta-Analysis. *European Review for Medical & Pharmacological Sciences*, **24**, 7240-7252.
- [19] Padhani, A.R., Lecouvet, F.E., Tunariu, N., Koh, D., De Keyzer, F., Collins, D.J., *et al.* (2017) Rationale for Modernising Imaging in Advanced Prostate Cancer. *European Urology Focus*, **3**, 223-239. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2016.06.018>
- [20] Hofman, M.S., Hicks, R.J., Maurer, T. and Eiber, M. (2018) Prostate-Specific Membrane Antigen PET: Clinical Utility in Prostate Cancer, Normal Patterns, Pearls, and Pitfalls. *RadioGraphics*, **38**, 200-217. <https://doi.org/10.1148/rq.2018170108>
- [21] Houshmand, S., Lawhn-Heath, C. and Behr, S. (2023) PSMA PET Imaging in the Diagnosis and Management of Prostate Cancer. *Abdominal Radiology*, **48**, 3610-3623. <https://doi.org/10.1007/s00261-023-04002-z>
- [22] Oliveira, J., Gomes, C., Faria, D., Vieira, T., Silva, F., Vale, J., *et al.* (2017) ⁶⁸Ga-Prostate-Specific Membrane Antigen Positron Emission Tomography/Computed Tomography for Prostate Cancer Imaging: A Narrative Literature Review. *World Journal of Nuclear Medicine*, **16**, 3-7. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.198237>
- [23] Chen, R., Ng, Y.L., Yang, X., Zhu, Y., Li, L., Zhao, H., *et al.* (2023) Comparison of Parametric Imaging and SUV Imaging with [⁶⁸Ga]Ga-Psma-11 Using Dynamic Total-Body PET/CT in Prostate Cancer. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **51**, 568-580. <https://doi.org/10.1007/s00259-023-06456-1>
- [24] Simsek, D.H., Sanli, Y., Civan, C., Engin, M.N., Isik, E.G., Ozkan, Z.G., *et al.* (2020) Does Bone Scintigraphy Still Have a Role in the Era of ⁶⁸Ga-PSMA PET/CT in Prostate Cancer? *Annals of Nuclear Medicine*, **34**, 476-485. <https://doi.org/10.1007/s12149-020-01474-7>
- [25] Radzina, M., Tirane, M., Roznere, L., *et al.* (2020) Accuracy of ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT and Multiparametric MRI for the Detection of Local Tumor and Lymph Node Metastases in Early Biochemical Recurrence of Prostate Cancer. *American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **10**, 106-118.
- [26] Regula, N., Kostaras, V., Johansson, S., Trampal, C., Lindström, E., Lubberink, M., *et al.* (2022) Comparison of ⁶⁸Ga-Psma PET/CT with Fluoride PET/CT for Detection of Bone Metastatic Disease in Prostate Cancer. *European Journal of Hybrid Imaging*, **6**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1186/s41824-022-00127-4>
- [27] von Eyben, F.E., Picchio, M., von Eyben, R., Rhee, H. and Bauman, G. (2018) ⁶⁸Ga-Labeled Prostate-Specific Membrane Antigen Ligand Positron Emission Tomography/Computed Tomography for Prostate Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Urology Focus*, **4**, 686-693. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2016.11.002>
- [28] Sheikhabaei, S., Jones, K.M., Werner, R.A., Salas-Fragomeni, R.A., Marcus, C.V., Higuchi, T., *et al.* (2019) ¹⁸F-NaF-PET/CT for the Detection of Bone Metastasis in Prostate Cancer: A Meta-Analysis of Diagnostic Accuracy Studies. *Annals of Nuclear Medicine*, **33**, 351-361. <https://doi.org/10.1007/s12149-019-01343-y>
- [29] Dyrberg, E., Hendel, H.W., Huynh, T.H.V., Klausen, T.W., Løgager, V.B., Madsen, C., *et al.* (2018) ⁶⁸Ga-PSMA-PET/CT in Comparison with ¹⁸F-Fluoride-PET/CT and Whole-Body MRI for the Detection of Bone Metastases in Patients with Prostate Cancer: A Prospective Diagnostic Accuracy Study. *European Radiology*, **29**, 1221-1230. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5682-x>
- [30] Hilund-Carlsen, P.F. and Alavi, A. (2020) Simultaneous PET/MRI in the Evaluation of Breast and Prostate Cancer Using Combined Na[¹⁸F]F and [¹⁸F]FDG: A Focus on Skeletal Lesions. *Molecular Imaging & Biology*, **22**, 219-220.
- [31] Zhou, J., Gou, Z., Wu, R., Yuan, Y., Yu, G. and Zhao, Y. (2019) Comparison of PSMA-PET/CT, Choline-PET/CT, NaF-PET/CT, MRI, and Bone Scintigraphy in the Diagnosis of Bone Metastases in Patients with Prostate Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Skeletal Radiology*, **48**, 1915-1924. <https://doi.org/10.1007/s00256-019-03230-z>
- [32] Evangelista, L., Guttilla, A., Zattoni, F., Muzzio, P.C. and Zattoni, F. (2013) Utility of Choline Positron Emission Tomography/Computed Tomography for Lymph Node Involvement Identification in Intermediate- to High-Risk Prostate Cancer: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis. *European Urology*, **63**, 1040-1048. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2012.09.039>
- [33] Kimura, K., Kitajima, K., Kawanaka, Y., Yokoyama, H., Komoto, H., Fujiwara, M., *et al.* (2022) Evaluation of ¹¹C-Choline Positron Emission Tomography/computed Tomography for Determining Treatment Response in Castration-Resistant Prostate Cancer Patients. *International Journal of Urology*, **29**, 1072-1078. <https://doi.org/10.1111/iju.14992>
- [34] Hong, H., Liang, D., Liu, Q., Wu, G., Sun, R., Liu, J., *et al.* (2022) Value of Transrectal Contrast-Enhanced Ultrasound with Clinical Indicators in the Prediction of Bone Metastasis in Prostate Cancer. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **12**, 1750-1761. <https://doi.org/10.21037/qims-21-365>
- [35] 龙玉屏, 黄珊珊, 赵中千, 等. 经直肠常规超声, 实时组织弹性成像及超声造影联合应用对侵袭性前列腺癌的诊断价值[J]. 临床超声医学杂志, 2022, 24(4): 291-294.

-
- [36] 王雅丽, 红华, 吴国柱, 等. 前列腺钙化、PSA、Gleason 评分与前列腺癌骨转移的相关性分析[J]. 中国超声医学杂志, 2020, 36(5): 458-462.
- [37] Gillies, R.J., Kinahan, P.E. and Hricak, H. (2016) Radiomics: Images Are More than Pictures, They Are Data. *Radiology*, **278**, 563-577. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015151169>
- [38] Bernatz, S., Ackermann, J., Mandel, P., Kaltenbach, B., Zhdanovich, Y., Harter, P.N., *et al.* (2020) Comparison of Machine Learning Algorithms to Predict Clinically Significant Prostate Cancer of the Peripheral Zone with Multiparametric MRI Using Clinical Assessment Categories and Radiomic Features. *European Radiology*, **30**, 6757-6769. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07064-5>
- [39] 姬健智, 张倩, 牛猛, 等. 联合临床, MR T2WI 及表观弥散系数图影像组学特征列线图预测初发前列腺癌骨转移[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(7): 1050-1055.
- [40] 宋鑫洋, 张甜, 王洋洋, 等. 临床和 MRI 影像组学及深度学习联合模型预测初发前列腺癌骨转移[J]. 中国介入影像与治疗学, 2023, 20(4): 212-217.
- [41] Zhou, C., Zhang, Y., Guo, S., Wang, D., Lv, H., Qiao, X., *et al.* (2023) Multiparametric MRI Radiomics in Prostate Cancer for Predicting Ki-67 Expression and Gleason Score: A Multicenter Retrospective Study. *Discover Oncology*, **14**, Article No. 133. <https://doi.org/10.1007/s12672-023-00752-w>