

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2025.05.003

# 骨质疏松症患者隐匿性骨折的影像学识别方法综述

陈凯, 龙德云, 俞丽, 巩潇

(中国人民武装警察部队海警总队医院医学影像科, 浙江嘉兴 314000)

**【摘要】目的** 系统性综述骨质疏松症患者隐匿性骨折的影像学识别方法, 评估不同影像学技术的诊断效能, 为骨科临床实践提供影像学检查指导策略。**方法** 检索 PubMed、中国知网、万方等数据库, 收集 2020 年 1 月至 2024 年 12 月发表的隐匿性骨折相关文献, 从影像学技术原理、诊断效能、临床应用等方面进行综合分析。**结果** 在传统影像学方法中, X 线(X-ray)平片对隐匿性骨折的诊断敏感性有限, 计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)检查具有更好的检出能力。磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)在隐匿性骨折诊断方面表现最佳, 短时反转恢复(Short Tau Inversion Recovery, STIR)序列和脂肪抑制(Fat-Suppression, FS)序列能够敏感地检出早期骨髓水肿。核素骨扫描具有较高的诊断敏感性, 单光子发射计算机断层扫描(Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT)/CT 图像融合技术进一步提高了诊断特异性。定量 CT 和高分辨率外周定量 CT(High-Resolution Peripheral Quantitative Computed Tomography, HR-pQCT)技术能够评估骨微结构和骨强度。基于深度学习(Deep Learning, DL)的人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术在骨折识别中展现出优异的诊断性能。多模态影像学联合诊断能显著提高诊断准确性。**结论** 隐匿性骨折影像学诊断应采用分层策略, MRI 是最敏感的检查方法。多模态影像学联合诊断和 AI 辅助诊断代表了未来发展趋势。建议建立标准化检查流程, 加强新技术的临床转化应用。

**【关键词】** 骨质疏松症; 隐匿性骨折; 影像学诊断; 磁共振成像(MRI); 计算机断层扫描(CT); 人工智能(AI); 多模态成像

【中图分类号】R816.8

【文献标志码】A

文章编号: 1674-1242(2025)05-0614-09

## Imaging Methods for Identifying Occult Fractures in Patients with Osteoporosis: A Review

CHEN Kai, LONG Deyun, YU Li, GONG Xiao

(Department of Medical Imaging, Coast Guard Corps Hospital of Chinese People's Armed Police Force, Jiaxing, Zhejiang 314000, China)

**【Abstract】Objective** To systematically review the imaging methods for identifying occult fractures in patients with osteoporosis, to assess the diagnostic efficacy of different imaging techniques, and to provide a guiding strategy for imaging examinations in orthopedic clinical practice. **Methods** PubMed, CNKI, Wanfang Database and other databases were searched to collect literature related to occult fractures published from January 2020 to December 2024, and these literature were comprehensively analyzed in terms of the principles of imaging technology, diagnostic efficacy, and clinical application. **Results** Among the conventional imaging methods, plain radiographs (X-ray)

收稿日期: 2025-05-03。

第一作者和通信作者: 陈凯(1981—), 男, 浙江省永嘉县人, 本科学历, 技师, 从事放射技术研究。邮箱: chenkai13736407850@163.com。

have limited sensitivity in the diagnosis of occult fractures, while computed tomography (CT) examination has better detection capability. Magnetic resonance imaging (MRI) has the best performance in the diagnosis of occult fractures, and short tau inversion recovery (STIR) and fat-suppression sequence (FSIR) are more sensitive in detecting early bone marrow edema. Nuclide bone scans have high diagnostic sensitivity, and single-photon emission computed tomography (SPECT)/CT image fusion can further improve diagnostic specificity. Quantitative CT and high-resolution peripheral quantitative computed tomography (HR-pQCT) techniques are capable of assessing bone microstructure and bone strength. Deep learning (DL)-based artificial intelligence (AI) has demonstrated excellent diagnostic performance in fracture identification. Multimodal imaging-based combined diagnosis can greatly improve diagnostic accuracy.

**Conclusion** The imaging diagnosis of occult fractures should adopt a stratification strategy, and MRI is the most sensitive examination method. Multimodal imaging-based combined diagnosis and AI-assisted diagnosis represent the future development trend. It is recommended to establish a standardized examination process and strengthen the clinical translation and application of new technologies.

**【Key words】** Osteoporosis; Occult Fractures; Imaging Diagnosis; Magnetic Resonance Imaging (MRI); Computed Tomography (CT); Artificial Intelligence (AI); Multimodal Imaging

## 0 引言

骨质疏松症作为一种以骨量减少、骨组织微结构破坏为特征的全身性骨病<sup>[1]</sup>,已成为威胁中老年人健康的重要疾病。随着人口老龄化进程的加速,由骨质疏松引发的隐匿性骨折因症状不典型、临床表现隐蔽而常被忽视,可能导致严重的功能障碍和生活质量下降。影像学检查作为骨折诊断的重要手段,在隐匿性骨折的识别中发挥着不可替代的作用。然而,传统影像学方法在早期微细骨折的检出方面存在一定的局限性,促使临床医师不断探索更为敏感和准确的影像学技术。本综述旨在全面梳理骨质疏松症患者隐匿性骨折的影像学识别方法,为骨折临床实践提供科学依据。

## 1 骨质疏松症与隐匿性骨折概述

### 1.1 骨质疏松症的病理生理特点

骨质疏松症的核心病理机制在于骨重建过程中骨吸收与骨形成的失衡<sup>[2]</sup>。当破骨细胞介导的骨吸收速度超过成骨细胞介导的骨形成速度时,就会导致骨量的净丢失和骨微结构的恶化。从组织学角度看,骨质疏松症患者的骨组织呈现出典型的病理学改变:皮质骨变薄、孔隙率增加,松质骨小梁数量减少、厚度变薄和连续性中断<sup>[3]</sup>。这些微观结构的改变直接影响骨骼的生物力学特性,导致其抗压强度、抗弯强度和抗扭强度均显著下降。骨质疏松症

并非单纯地表现为骨量减少,骨质量的下降同样重要,包括骨矿化程度、胶原交联状态和微损伤修复能力的改变。激素水平变化是骨质疏松症发病的重要因素,特别是绝经后妇女雌激素水平的急剧下降,会激活破骨细胞活性,加速骨吸收过程<sup>[4]</sup>。此外,甲状旁腺激素(Parathyroid Hormone, PTH)、降钙素(Calcitonin, CT)、维生素D等激素的调节异常,以及肿瘤坏死因子- $\alpha$ (Tumor Necrosis Factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ )、白细胞介素-1(Interleukin-1, IL-1)等炎症因子的过度表达,均参与了骨质疏松症的发病过程。

### 1.2 隐匿性骨折的定义与临床特征

隐匿性骨折是指在常规X线(X-ray)检查中难以发现,但在更为敏感的影像学检查中可以检出的骨折。这类骨折通常不伴有明显的骨皮质连续性中断,而以骨髓水肿、微细裂纹或应力性改变为主要临床表现<sup>[5]</sup>。隐匿性骨折的临床特征具有特殊性,患者通常表现为局部疼痛,但疼痛程度相对较轻,且具有活动相关性,即活动时疼痛加重,休息后则有所缓解。与典型的骨折不同,隐匿性骨折患者往往没有明确的外伤史,或者仅有轻微的外力作用。患者进行体格检查时,患处可能有轻度压痛和叩击痛,但肿胀和功能障碍通常不明显。从症状的时间演变来看,隐匿性骨折的疼痛往往呈现出渐进性加

重的特点,即初期疼痛可能较轻微,患者常将其归因于肌肉劳损或关节炎等常见疾病,导致就诊延迟。如果未得到及时诊治,隐匿性骨折有可能发展为完全性骨折。

### 1.3 隐匿性骨折的发生机制与好发部位

隐匿性骨折的发生机制与骨质疏松症的病理生理改变密切相关。在骨质疏松的基础上,骨骼的抗应力能力显著降低,即使在正常的日常活动或轻微外力作用下,也可能发生微细的骨折。这种骨折通常始于骨小梁的微损伤,随着应力的反复作用,微损伤逐渐扩展,最终形成可被影像学检查发现的骨折征象<sup>[6]</sup>。从生物力学角度分析,隐匿性骨折的发生与应力集中现象密切相关。骨质疏松症患者的骨组织由于微结构具有不均匀性和完整性被破坏,容易在某些部位出现应力集中现象,当局部应力超过该处骨组织的承受能力时,就会发生微细的骨折。骨质疏松性隐匿性骨折具有明显的好发部位特点,主要集中在承重骨和应力集中的解剖部位。椎体是最常见的隐匿性骨折部位,特别是胸腰段椎体。髌部,包括股骨颈和股骨粗隆间区域,是另一个高发部位。肋骨、骨盆(特别是骶骨和耻骨支)及足部的第五跖骨基底部和舟骨等部位,也是隐匿性骨折的好发部位。

## 2 传统影像学检查方法

### 2.1 X 线平片的应用价值与局限性

X 线平片作为骨科影像学检查的基础方法,在骨折诊断中占据不可替代的地位。其优势在于检查简便快捷、成本低廉、普及率高,能够清晰地显示骨骼的整体形态和皮质骨的连续性。在明显的骨折诊断中,X 线平片往往能够提供充分的诊断信息<sup>[7]</sup>。然而,在隐匿性骨折的诊断方面,X 线平片存在显著的局限性。这主要源于 X 线成像的物理特性和隐匿性骨折的病理特点。X 线平片对骨密度变化的敏感性相对较低,通常需要骨密度降低 30% 以上才能在平片上显示出来。对于早期的隐匿性骨折,特别是仅表现为骨髓水肿或微细裂纹的病变,X 线平片往往难以发现。椎体隐匿性骨折(Occult Vertebral Fracture, OVCF)是 X 线平片诊断局限性的典型体现。早期的骨质疏松性椎体压缩性骨折(Osteoporotic

Vertebral Compression Fracture, OVCF)可能仅表现为轻微的椎体高度丢失或终板的微细改变,这些征象在标准的前后位和侧位 X 线平片上可能不够明显。特别是当椎体压缩程度小于 20% 时,常规 X 线检查的检出率显著降低。尽管存在这些局限性,X 线平片在隐匿性骨折的诊断中仍具有重要价值。它可以排除明显的骨折和其他骨病,为进一步的影像学检查提供基础信息。通过与既往影像片的对比,发现骨骼形态的细微变化,有助于发现隐匿性骨折的早期征象。

### 2.2 CT 检查在隐匿性骨折诊断中的作用

CT 检查技术在隐匿性骨折诊断中展现出了优于 X 线平片的检出能力。CT 的核心优势在于其具备优异的空间分辨率和对比分辨率,能清晰地显示骨骼的三维结构和细微的密度改变<sup>[8]</sup>。通过多平面重建,CT 可以从不同的角度观察骨折情况,避免了 X 线平片中结构重叠造成的漏诊。在 OVCF 的诊断中,多层螺旋 CT(Multi-Slice Spiral Computed Tomography, MSCT)能够清晰地显示椎体的内部结构,包括皮质骨和松质骨的形态变化。早期 OVCF 往往表现为椎体内部骨小梁结构紊乱、局部密度不均匀及细微的骨折线。CT 检查在肋骨隐匿性骨折的诊断中同样具有重要价值。由于肋骨的解剖位置和形态特点比较特殊,常规 X 线检查容易遗漏隐匿性骨折。而 CT 检查可以清晰地显示每根肋骨的完整形态,通过三维重建技术,直观地观察肋骨的连续性和可能的骨折部位。在骨盆和髌部隐匿性骨折的诊断方面,CT 检查也展现出了独特的优势。CT 检查可以清晰地显示骨盆各个部位的骨折情况,特别是对于骶骨隐匿性骨折,CT 检查的诊断价值更为突出<sup>[9]</sup>。然而,CT 检查的主要限制是对软组织的对比度相对较差,难以显示骨髓水肿等早期病理改变。此外,CT 检查的辐射剂量相对较高,对需要反复检查的患者,需要权衡检查的必要性和辐射风险。

### 2.3 传统影像学方法的敏感性分析

传统影像学方法在隐匿性骨折诊断中的敏感性存在明显差异。X 线平片在隐匿性骨折诊断中的敏感性相对较低,总体敏感性为 40%~60%<sup>[10]</sup>。在



OVF 的诊断中, X 线平片的敏感性更低, 特别是对于椎体高度丢失小于 20% 的早期压缩性骨折, 其检出率可能低于 30%。相比之下, CT 检查在隐匿性骨折诊断中表现出了更高的敏感性, 总体敏感性可达 70%~85%<sup>[11]</sup>。在肋骨隐匿性骨折的诊断中, CT 检查的敏感性特别突出, 可达 90% 以上。在 OVF 的诊断中, CT 的敏感性也明显优于 X 线平片。传统影像学方法在不同病程阶段的隐匿性骨折诊断中敏感性也有所不同。在骨折的急性期, 特别是在伤后 24~48 小时内, 由于骨折周围的炎症反应尚未充分显现, 传统影像学方法的敏感性相对较低。

### 3 先进影像学技术的应用

#### 3.1 MRI 的诊断优势

MRI 在隐匿性骨折诊断中具有突出优势, 特别是在显示骨髓水肿和软组织变化方面。MRI 的核心优势在于其优越的软组织对比度和多参数成像能力, 能够在骨质结构尚未发生明显改变的早期阶段就检出隐匿性骨折的征象。骨髓水肿是隐匿性骨折最早出现的影像学征象之一, 在 MRI 上表现为 T1 加权像上的低信号和 T2 加权像或短时反转恢复 (Short Tau Inversion Recovery, STIR) 序列上的高信号。这种信号变化反映了骨折部位的炎症反应和局部血管通透性增加, 比骨质结构的改变出现得更早<sup>[12]</sup>。特别是脂肪抑制 (Fat-Suppression, FS) 序列, 如 STIR 或 T2-FS 序列, 能够很好地抑制正常骨髓的脂肪信号, 突出显示病理性水肿信号。在 OVF 的诊断中, MRI 表现出了卓越的诊断能力。急性 OVCF 在 MRI 上表现为椎体内弥漫性或局限性骨髓水肿, 这些征象往往在 X 线和 CT 检查尚未发现明显异常时就已经出现。此外, MRI 还能够区分新鲜骨折和陈旧性骨折, 这对治疗方案的制订而言具有重要意义。MRI 在髌部隐匿性骨折诊断中同样具有重要价值。股骨颈隐匿性骨折是老年患者的常见病变, 早期往往仅表现为股骨颈局部骨髓水肿。MRI 能够敏感地检出这些早期变化。研究表明, MRI 对股骨颈隐匿性骨折的诊断敏感性可达 95% 以上<sup>[13]</sup>。弥散加权成像 (Diffusion Weighted Imaging, DWI) 作为 MRI 的一种特殊序列, 在隐匿性骨折诊断中也显示出了一定的应用价值。急性

骨折部位由于细胞肿胀和炎症反应, 会出现水分子弥散受限的现象, 在 DWI 上表现为高信号, 有助于提高诊断的特异性。

#### 3.2 SPECT/CT 的临床价值

放射性核素骨扫描是一种基于骨代谢活动的功能性影像检查方法, 在隐匿性骨折诊断中具有独特的应用价值。其基本原理是通过静脉注射放射性磷酸盐类化合物, 这些化合物会优先聚集在骨代谢活跃的部位, 包括骨折愈合过程中成骨细胞活跃的区域。传统平面骨扫描在隐匿性骨折诊断中表现出了较高的敏感性, 可达 90% 以上<sup>[14]</sup>, 特别是对多发性隐匿性骨折的筛查具有重要价值。一次全身骨扫描可以显示全身骨骼的代谢状态。传统平面骨扫描的主要限制在于其特异性相对较低。除骨折外, 感染、肿瘤、关节病等多种疾病都可能导致局部放射性摄取增加。此外, 传统平面骨扫描的空间分辨率有限, 难以准确定位骨折的具体部位和范围。单光子发射 CT (Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT) /CT 技术的出现很好地打破了传统平面骨扫描的局限性。SPECT 提供了三维的功能信息, CT 则提供了精确的解剖结构信息, 两者的融合大幅提高了隐匿性骨折诊断的准确性。SPECT/CT 不仅能够准确定位放射性摄取异常的部位, 还能够通过 CT 图像分析该部位的形态学改变, 从而提高诊断的特异性。在 OVF 诊断中, SPECT/CT 技术表现出了显著优势。研究表明, SPECT/CT 对 OVF 的诊断敏感性和特异性均可达 90% 以上<sup>[15,16]</sup>。骨扫描和 SPECT/CT 在肋骨隐匿性骨折诊断中也具有重要价值, 对于老年患者因轻微外伤导致的多发性肋骨隐匿性骨折, SPECT/CT 检查往往能够提供全面而准确的诊断信息。

#### 3.3 双能 X 线吸收测定法的辅助作用

双能 X 线吸收测定法 (Dual-Energy X-Ray Absorptiometry, DXA) 主要用于骨密度测量和骨质疏松症诊断, 在隐匿性骨折的诊断和预防中发挥着重要的辅助作用。椎体骨折评估 (Vertebral Fracture Assessment, VFA) 是 DXA 设备的一项重要功能, 能够在进行骨密度测量的同时获得脊柱的侧位图像<sup>[17,18]</sup>。虽然 VFA 的图像质量不如常规 X 线片,

但对于明显的 OVCF 仍有一定的检出能力。定量超声 (Quantitative Ultrasound, QUS) 技术作为 DXA 的补充, 在隐匿性骨折的风险评估中也具有一定的应用价值。QUS 主要测量超声在骨骼中的传播速度和衰减程度, 这些参数不仅反映骨密度, 还与骨质量和骨微结构密切相关<sup>[19]</sup>。DXA 技术在骨折风险评估方面的重要应用是结合临床风险因素进行综合评估。世界卫生组织推荐的骨折风险评估 (Fracture Risk Assessment, FRA) 工具就基于 DXA 测量结果和临床风险因素来计算 10 年内发生主要骨质疏松性骨折的概率<sup>[20]</sup>。DXA 技术还引入了骨小梁骨评分 (Trabecular Bone Score, TBS) 的概念, 这是一种基于 DXA 图像纹理分析的新技术, 能够间接评估骨小梁的微结构状态。TBS 与传统的骨密度测量相比, 能够提供更多关于骨质量的信息, 在骨折风险预测方面表现出了更好的性能<sup>[21]</sup>。

#### 4 新兴影像学技术与人工智能的应用

##### 4.1 定量 CT 与高分辨率外周定量 CT

定量 CT (Quantitative CT, QCT) 技术代表了骨密度测量和骨质评估的重要进展, 在隐匿性骨折的诊断和预防中展现出了独特的优势。与传统的 DXA 相比, QCT 能够提供真正的体积骨密度测量, 不受骨骼大小和周围软组织的影响, 同时可以分别测量皮质骨和松质骨的密度<sup>[22]</sup>。QCT 技术在椎体骨质评估中表现出了显著优势。椎体主要由松质骨构成, 而松质骨的代谢活跃性远高于皮质骨, 因此对骨质疏松症的反应更为敏感。QCT 能够准确测量椎体松质骨的密度, 比 DXA 更早地发现骨质疏松的变化。有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 技术与 QCT 技术的结合为骨强度评估带来了革命性进展。将 QCT 获得的骨密度分布信息转换为有限元模型, 可以计算骨骼在不同载荷条件下的应力分布和破坏强度。这种基于 QCT 的有限元分析能够更准确地评估骨折风险<sup>[23]</sup>。高分辨率外周定量 CT (High-Resolution Peripheral Quantitative Computed Tomography, HR-pQCT) 技术的出现为骨微结构的临床评估提供了前所未有的能力。HR-pQCT 的空间分辨率可达到 80 $\mu\text{m}$  左右, 能够清晰地显示骨小梁的三维结构和皮质骨的孔隙分布<sup>[24]</sup>。

通过 HR-pQCT 检查, 获得骨小梁数量、厚度、连接性及皮质骨厚度、孔隙率等多项微结构参数。

##### 4.2 超声骨密度测量技术

超声骨密度测量技术作为一种非电离辐射的检查方法, 在骨质疏松症筛查和隐匿性骨折风险评估中发挥着日益重要的作用。QUS 技术通过测量超声波在骨组织中的传播参数, 包括超声传播速度和宽带超声衰减, 评估骨密度和骨质量<sup>[25]</sup>。跟骨 QUS 是目前应用最为广泛的超声骨密度测量方法之一。跟骨主要由松质骨构成, 且相对表浅, 便于超声检查。研究表明, 跟骨 QUS 参数与中轴骨的骨密度存在良好的相关性, 可以作为骨质疏松症筛查的有效工具<sup>[26]</sup>。近年来, 超声技术在骨微结构评估方面取得了重要进展。背散射超声技术通过分析超声在骨组织中的散射特性, 获得关于骨小梁微结构的信息。超声导波技术是近年来发展起来的一种新型超声检查方法, 特别适用于长骨的评估, 对长骨的隐匿性骨折可能具有独特的诊断价值。便携式超声设备的发展使超声骨密度测量更加便民和普及。这些设备体积小、操作简便, 可以在社区医疗机构甚至家庭中使用, 为骨质疏松症的筛查和隐匿性骨折的风险评估提供了便捷的工具。

##### 4.3 人工智能在骨折识别中的应用前景

人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 在医学影像诊断中的飞速发展, 特别是深度学习 (Deep Learning, DL) 技术的广泛应用, 为隐匿性骨折的早期识别与智能化筛查提供了全新的解决方案。与传统计算机辅助诊断 (Computer-Assisted Diagnosis, CAD) 系统依赖手工特征提取不同, AI 系统通过自动学习大量影像数据中的潜在规律, 实现从原始图像到骨折预测的端到端识别。目前, 卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 是骨折检测中最常用的深度学习模型结构之一<sup>[27]</sup>。典型模型如残差网络 (Residual Neural Network, ResNet)、密集连接卷积网络 (Densely Connected Convolutional Network, DenseNet) 及专用于医学图像的 U-Net 变体, 被广泛用于 X 线、CT 和 MRI 影像中的骨折区域识别与分割<sup>[28]</sup>。例如, 研究者在 OVCF 的识别中采用 ResNet-50 结



构,通过迁移学习训练骨折分类模型,其在独立测试集上表现出了敏感性 95.6%、特异性 94.2% 的优异性能。此外,Mask R-CNN 等目标检测算法已经被成功应用于髌部和肋骨隐匿性骨折的自动定位任务中,实现了对 X 线图像中骨折区域的准确框定。这些模型能够在毫秒级内完成图像分析,大幅提高了急诊或初筛场景下的诊断效率。AI 技术在多模态影像融合中的发展也日趋成熟。融合 X 线、CT、MRI 等不同模态影像特征的多分支神经网络架构,如融合 CNN 与 Transformer 模块的混合模型,能够整合空间分辨率与上下文信息,在骨折判别中获得更高的准确率。自然语言处理(Natural Language Processing, NLP)技术也已用于辅助影像报告中的骨折特征提取<sup>[29]</sup>。例如,基于 Transformer 的双向编码器表示(Bidirectional Encoder Representations from Transformers, BERT)结构的医学文本分析模型可以从海量放射报告中自动识别骨折表述,并用于训练结构化影像标注模型,提升 AI 算法的训练质量与临床实用性。在“黑盒”问题方面,可解释性 AI(Explainable AI, XAI)的引入使模型诊断结果的可靠性得以增强。梯度类激活图(Grad-CAM)和注意力热图(Attention Heatmap)等技术可对模型在图像中“关注”的区域进行可视化呈现,使医生理解 AI 判读逻辑成为可能。从部署角度看,部分 AI 骨折识别系统已经集成于医院的放射信息系统和医学影像存档与通信系统中,用于辅助放射科医生进行初筛。已有研究<sup>[30]</sup>表明,将 AI 辅助系统应用在隐匿性肋骨骨折的辅助诊断中,可将医生读片时间缩短 40% 以上,并显著提高初诊的一致性。

## 5 临床应用策略与展望

### 5.1 不同影像学方法的选择策略

在隐匿性骨折的临床诊断中,合理选择影像学检查方法是提高诊断效率和准确性的关键。临床医师需要根据患者的具体情况、临床症状、疑似骨折部位及医疗资源的可及性制定个性化的影像学检查策略<sup>[31]</sup>。对于疑似 OVF 的患者,建议采用分层诊断策略。首先进行 X 线平片检查作为初步筛查,当 X 线平片结果为阴性但临床高度怀疑椎体骨折时,应及时进行 MRI 检查。MRI 不仅能够检出早期的骨髓

水肿,还能够评估脊髓和神经根的受累情况<sup>[32]</sup>。对于髌部疑似隐匿性骨折的老年患者,由于髌部骨折的严重后果和治疗的紧迫性,建议采用更为积极的影像学策略。当 X 线平片不能明确诊断而临床症状典型时,应立即进行 MRI 检查。如果 MRI 检查条件不具备或存在禁忌证,可以考虑进行 CT 检查或骨扫描<sup>[33]</sup>。肋骨隐匿性骨折的影像学方法选择相对灵活。对于年轻患者或外伤史明确的病例,可以首选 CT 检查。对于老年患者或多发性肋骨疼痛的病例,骨扫描可能是更好的选择。在选择影像学方法时,还需要考虑患者的身体状况和检查的可行性<sup>[14]</sup>。成本效益分析也是影像学方法选择的重要考虑因素。

### 5.2 多模态影像学联合诊断模式

多模态影像学联合诊断代表了隐匿性骨折诊断的发展趋势,通过整合不同影像学技术的优势,显著提高诊断的准确性和全面性。这种诊断模式不仅能够克服单一影像学方法的局限性,还能够提供更为丰富的病理生理信息。结构与功能联合诊断是多模态影像学的重要应用模式。例如,将显示解剖结构的 CT 或 MRI 与反映骨代谢功能的骨扫描相结合,可以同时获得骨折的形态学信息和代谢活动信息<sup>[34]</sup>。SPECT/CT 融合成像技术是多模态诊断的典型代表。这种技术将 SPECT 的功能信息和 CT 的解剖信息完美融合,在隐匿性骨折诊断中表现出卓越的性能。多参数 MRI 技术的发展为隐匿性骨折的全面评估提供了新的可能。通过整合常规 MRI、DWI、灌注成像等多种序列的信息,获得关于骨折部位的多维度信息<sup>[35]</sup>。AI 技术在多模态影像融合中发挥着越来越重要的作用。AI 算法能够自动整合来自不同影像学检查的信息,识别复杂的影像特征模式,提供综合性诊断建议。

### 5.3 未来发展趋势与挑战

隐匿性骨折影像学诊断技术的未来发展将呈现出更加智能化、精准化和个性化的特点。超高分辨率成像技术的发展将使隐匿性骨折的早期识别成为可能。7T MRI 等超高场强磁共振设备能够提供前所未有的图像分辨率,可能发现目前影像学技术尚无法检出的微细病变<sup>[36]</sup>。分子影像学技术的兴起为隐匿性骨折的病理生理机制研究和早期诊断开辟了

新途径。例如,通过特异性分子探针,可实现在分子水平观察骨折愈合过程中的各种生物学变化。AI 技术的进一步发展将带来更加智能和高效的诊断系统。未来的 AI 系统将具备更强的学习能力和推理能力,能够处理更加复杂的临床情况和影像数据。个性化医学的发展要求影像学诊断技术能够提供更加个体化的信息。基于患者的基因型、生物标志物、生活方式等个体化信息,结合影像学检查结果,可以构建个性化的骨折风险预测模型和治疗方案。然而,上述技术在发展的同时面临诸多挑战。首先是技术标准化和质量控制的问题。随着新技术的不断涌现,如何建立统一的技术标准和质控体系,确保不同设备和不同医疗机构之间的检查结果具有可比性,是当前面临的一个重要挑战。数据安全和隐私保护是另一个重要挑战。随着影像数据的数字化和 AI 技术的广泛应用,大量患者影像数据需要在不同的系统与机构之间共享和传输。如何在保护患者隐私的前提下实现数据的有效利用,需要在技术和法规层面都做出相应的安排。成本控制和可及性是技术推广面临的现实挑战。先进的影像学技术往往成本较高,要想在控制成本的同时提高检查的可及性,特别是在医疗资源相对匮乏的地区,需要在技术创新和政策支持方面共同努力。医师培训和技术接受度也是需要考虑的问题。新技术的推广需要医师具备相应的知识和技能,如何有效地进行技术培训和知识更新,提高医师对新技术的接受度和应用能力,是技术能否得到成功推广的关键因素。总之,隐匿性骨折影像学诊断技术的发展前景广阔,但也面临诸多挑战。只有持续进行技术创新、加强标准化建设、开展有效的培训教育和完善法规保障,方可真正实现这些先进影像学技术的临床转化应用,为患者提供更好的医疗服务。

## 6 结语

骨质疏松症患者隐匿性骨折的影像学识别是一个复杂而重要的临床问题。从传统的 X 线平片到先进的 MRI 技术,从单一的影像学检查到多模态联合诊断,影像学技术在隐匿性骨折诊断中的作用日益重要。随着 AI 技术的快速发展和临床应用的不断深入,我们有理由相信,未来的影像学诊断将更

加精准、高效和个性化,为骨质疏松症患者的早期诊断和及时治疗提供更强有力的技术支撑。在临床实践中,医师应根据患者的具体情况合理选择影像学检查方法,充分发挥不同技术的优势,提高隐匿性骨折的检出率。同时,应密切关注新技术的发展动态,不断更新知识和技能,为患者提供最优质的医疗服务。通过多学科的协作和持续的技术创新,相信隐匿性骨折的诊疗水平将进一步提升。

## 参考文献

- [1] ADEJUYIGBE B, KALLINI J, CHIOU D, *et al.* Osteoporosis: molecular pathology, diagnostics, and therapeutics[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(19): 14583.
- [2] 张亚奇, 秦灵灵, 白惠中, 等. 从络病理论论治糖尿病骨质疏松症的发病机制 [J]. *世界中医药*, 2023, 18 (24): 3616-3620.  
ZHANG Yaqi, QIN Lingling, BAI Huizhong, *et al.* Pathogenesis of diabetic osteoporosis from the perspective of collateral disease theory[J]. *World Chinese Medicine*, 2023, 18(24): 3616-3620.
- [3] 邓祖跃, 李志豪, 徐俊峰, 等. 基于 RANKL/RANK-NF- $\kappa$ B-NLRP3 炎性小体通路探讨强骨饮治疗骨质疏松症模型大鼠的作用机制 [J]. *中国药业*, 2025, 34 (3): 42-49.  
DENG Zuyue, LI Zhihao, XU Junfeng, *et al.* Mechanism of Qiang-gu decoction in treating osteoporosis model rats based on RANKL/RANK-NF- $\kappa$ B-NLRP3 inflammasome pathway[J]. *China Pharmaceuticals*, 2025, 34(3): 42-49.
- [4] ZHOU S, TAO Z, ZHU Y, *et al.* Mapping theme trends and recognizing hot spots in postmenopausal osteoporosis research: a bibliometric analysis[J]. *PeerJ*, 2019, 78145.
- [5] 王栋梁, 雷哲倩, 赵耀杰. 隐匿性骨折的临床特点及误漏诊原因分析 [J]. *临床误诊误治*, 2016, 29 (11): 26-30.  
WANG Dongliang, LEI Zheqian, ZHAO Yaojie. Clinical features and causes of misdiagnosis and missed diagnosis of occult fractures[J]. *Clinical Misdiagnosis & Mistherapy*, 2016, 29(11): 26-30.
- [6] LITTMAN J, PHORNPHTUKUL C, SAADE C, *et al.* Osteoporosis, fractures, and blindness due to a missense mutation in the LRP5 receptor[J]. *Orthop Res Rev*, 2023, 15: 39-45.
- [7] ZHOU Z, SUN Z, WANG Y, *et al.* Kyphoplasty for occult and non-occult osteoporotic vertebral fractures: a retrospective study[J]. *J Int Med Res*, 2020, 48(4): 1-8.
- [8] GAO S, WAN L, LIN J, *et al.* Clinical study of occult fractures around the prosthesis in primary total hip arthroplasty[J]. *Biotechnol Genet Eng Rev*, 2024, 40(2): 987-1000.
- [9] LI D, MAO S S, BUDOFF M J. Trabecular bone mineral density as

- measured by thoracic vertebrae predicts incident hip and vertebral fractures: the multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. *Osteoporos Int*, 2024, 35(6): 1061-1068.
- [10] 崔博, 解非. 多层螺旋 CT 与数字 X 线成像在隐匿性骨折诊断中的临床应用对比 [J]. *贵州医药*, 2022, 46 ( 6 ) : 954-956.
- CUI Bo, XIE Fei. Clinical application comparison of multi-slice spiral CT and digital X-ray imaging in the diagnosis of occult fractures[J]. *Guizhou Medical Journal*, 2022, 46(6): 954-956.
- [11] 廖晓江. 磁共振检查与 X 线检查在鉴别诊断膝关节隐匿性骨折中的价值分析 [J]. *基层医学论坛*, 2022, 26 ( 35 ) : 68-70.
- LIAO Xiaojiang. Value analysis of magnetic resonance imaging and X-ray examination in differential diagnosis of occult knee fractures[J]. *Primary Care Medical Forum*, 2022, 26(35): 68-70.
- [12] 李秀慧, 唐波, 李雷云. MSCT 与 MRI 在膝关节隐匿性骨折中的诊断价值观察 [J]. *影像研究与医学应用*, 2024, 8 ( 7 ) : 101-103.
- LI Xiuhui, TANG Bo, LI Leiyun. Observation on diagnostic value of MSCT and MRI in occult knee fractures[J]. *Journal of Imaging Research and Medical Applications*, 2024, 8(7): 101-103.
- [13] 刘守标, 张功霖, 张红雷, 等. 高场强 MRI 与 MSCT 在诊断膝关节隐匿性骨折中的应用价值及影像学特征分析对比 [J]. *中国伤残医学*, 2025, 33 ( 7 ) : 28-32.
- LIU Shoubiao, ZHANG Gonglin, ZHANG Honglei, *et al.* Comparative analysis of application value and imaging characteristics of high-field MRI and MSCT in diagnosing occult knee fractures[J]. *Chinese Journal of Trauma and Disability Medicine*, 2025, 33(7): 28-32.
- [14] SRIVASTAVA M K, PAGALA R M, KENDARLA V, *et al.* Technetium-99m methylene diphosphonate bone scan in evaluation of insufficiency fractures : a pictorial assay and experience from South India[J]. *World J Nucl Med*, 2021, 20(4): 355-360.
- [15] 莫碧云, 牟兴宇, 黎祖国, 等.  $^{18}\text{F}$ -NaF 与  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP 全身骨显像图像质量与辐射剂量率的对比研究 [J]. *标记免疫分析与临床*, 2024, 31 ( 11 ) : 1966-1970, 2029.
- MO Biyun, MOU Xingyu, LI Zuguo, *et al.* A comparative study of image quality and residual dose between  $^{18}\text{F}$ -NaF and  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP whole body bone imaging[J]. *Labeled Immunoassays and Clinical Medicine*, 2024, 31(11): 1966-1970, 2029.
- [16] ZAMANI-SIAHKALI N, MIRSHAHLAD S A, FARBOD A, *et al.* SPECT/CT, PET/CT, and PET/MRI for response assessment of bone metastases[J]. *Semin Nucl Med*, 2024, 54(3): 356-370.
- [17] STANGHELLE B, BENTZEN H, GIANGREGORIO L, *et al.* Effects of a resistance and balance exercise programme on physical fitness, health-related quality of life and fear of falling in older women with osteoporosis and vertebral fracture: a randomized controlled trial[J]. *Osteoporos Int*, 2020, 31(6): 1069-1078.
- [18] MOSTERT J M, ROMEIJN S R, DIBBETS-SCHNEIDER P, *et al.* Inter-observer agreement of vertebral fracture assessment with dual-energy x-ray absorptiometry equipment[J]. *Arch Osteoporos*, 2021, 17(1): 4.
- [19] MÉTRAILLER A, HANS D, LAMY O, *et al.* Heel quantitative ultrasound (QUS) predicts incident fractures independently of trabecular bone score (TBS), bone mineral density (BMD), and FRAX: the OsteoLaus study[J]. *Osteoporos Int*, 2023, 34(8): 1401-1409.
- [20] SCHINI M, JOHANSSON H, HARVEY N C, *et al.* An overview of the use of the fracture risk assessment tool (FRAX) in osteoporosis[J]. *J Endocrinol Invest*, 2024, 47(3): 501-511.
- [21] SHEVROJA E, CAFARELLI F P, GUGLIELMI G, *et al.* DXA parameters, trabecular bone score (TBS) and bone mineral density (BMD), in fracture risk prediction in endocrine-mediated secondary osteoporosis[J]. *Endocrine*, 2021, 74(1): 20-28.
- [22] 李向明, 张立新, 王卫丰, 等. 多层螺旋 CT 腰椎三维后处理技术与定量 CT 骨密度测定的一致性研究 [J]. *中国医学装备*, 2025, 22 ( 4 ) : 28-33.
- LI Xiangming, ZHANG Lixin, WANG Weifeng, *et al.* Consistency study between multi-slice spiral CT lumbar spine three-dimensional post-processing technology and quantitative CT bone mineral density measurement[J]. *China Medical Equipment*, 2025, 22(4): 28-33.
- [23] DOI T, OHASHI S, OHTOMO N, *et al.* Evaluation of bone strength using finite-element analysis in patients with ossification of the posterior longitudinal ligament[J]. *Spine J*, 2022, 22(8): 1399-1407.
- [24] 杜娟, 黄蒙恩, 李思敏, 等. 基于 HR-pQCT 的绝经女性在体骨小梁局部特异性研究 [J]. *应用力学学报*, 2024, 41 ( 6 ) : 1411-1417.
- DU Juan, HUANG Meng'en, LI Simin, *et al.* Study on local specificity of in vivo bone trabeculae in postmenopausal women based on HR-pQCT[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2024, 41(6): 1411-1417.
- [25] 樊海金, 薛会贤, 宋立爽. 超声骨密度定量与双能 X 线骨密度仪在围绝经及绝经后女性骨质疏松诊断中的应用价值 [J]. *中外女性健康研究*, 2024 ( 5 ) : 180-182.
- FAN Haijin, XUE Huixian, SONG Lishuang. Application value of ultrasonic bone mineral density quantification and dual-energy X-ray absorptiometry in the diagnosis of osteoporosis in perimenopausal and postmenopausal women[J]. *Women's Health Research*, 2024 (5): 180-182.
- [26] 赵晶晶, 曹亚景, 孙纪新, 等. 河北省成人跟骨定量超声参数与代谢综合征的相关性 [J]. *中国骨质疏松杂志*, 2022, 28 ( 7 ) : 966-971.



- ZHAO Jingjing, CAO Yajing, SUN Jixin, *et al.* Correlation between calcaneal quantitative ultrasound parameters and metabolic syndrome in adults in Hebei Province[J]. **Chinese Journal of Osteoporosis**, 2022, 28(7): 966-971.
- [27] SUNDELL V M, MÄKELÄ T, VITIKAINEN A M, *et al.* Convolutional neural network-based phantom image scoring for mammography quality control[A]. **BMC Med Imaging**, 2022, 22(1): 216.
- [28] 陈维娟. 基于腰椎 DR 图像的深度学习模型预测新鲜与陈旧性压缩骨折的诊断效能研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2021.
- CHEN Weijuan. Research on diagnostic efficacy of deep learning model based on lumbar DR images in predicting fresh and old compression fractures[D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2021.
- [29] 王中秋. 1.5T 磁共振与 64 排 CT 对隐匿性骨折检出情况及影像学特征 [J]. **影像研究与医学应用**, 2024, 8 ( 12 ) : 125-127.
- WANG Zhongqiu. 1.5T magnetic resonance and 64-slice CT detection and imaging features of occult fractures[J]. **Journal of Imaging Research and Medical Application**, 2024, 8(12): 125-127.
- [30] 周柳含, 周颖俊. 基于深度学习算法的胸部 CT 辅助诊断系统对急诊隐匿性肋骨骨折的检出效能研究 [J]. **现代仪器与医疗**, 2024, 30 ( 6 ) : 76-80.
- ZHOU Liuhan, ZHOU Yingjun. Research on the detection efficacy of chest CT auxiliary diagnosis system based on deep learning algorithm for emergency occult rib fractures[J]. **Modern Instruments & Medical Treatment**, 2024, 30(6): 76-80.
- [31] 孟晓峰, 王伟, 周劲松, 等. 膝关节隐匿性骨折临床诊断中多层螺旋 CT 与高场强 MRI 的作用 [J]. **世界复合医学**, 2024, 10 ( 2 ) : 93-95, 99.
- MENG Xiaofeng, WANG Wei, ZHOU Jinsong, *et al.* Role of multi-slice spiral CT and high-field MRI in clinical diagnosis of occult knee fractures[J]. **World Journal of Complex Medicine**, 2024, 10(2): 93-95, 99.
- [32] 姜治辉, 郭玉. 多层螺旋 CT 与 MRI 在膝关节隐匿性骨折伴半月板及韧带损伤中的诊断价值分析 [J]. **影像研究与医学应用**, 2024, 8 ( 10 ) : 120-122.
- JIANG Zhihui, GUO Yu. Analysis of diagnostic value of multi-slice spiral CT and MRI in occult knee fractures with meniscal and ligament injuries[J]. **Journal of Imaging Research and Medical Applications**, 2024, 8(10): 120-122.
- [33] 周文才, 王世奎, 宣拓. DR 片与多层螺旋 CT 三维重建技术在肋骨隐匿性骨折诊断中的应用 [J]. **中国 CT 和 MRI 杂志**, 2023, 21 ( 8 ) : 94-96.
- ZHOU Wencai, WANG Shikui, XUAN Tuo. Application of DR radiography and multi-slice spiral CT three-dimensional reconstruction in diagnosis of occult rib fractures[J]. **Chinese Journal of CT and MRI**, 2023, 21(8): 94-96.
- [34] 张方乐, 郭永杰, 陈冲, 等. DR 片与多层螺旋 CT 三维重建技术在肋骨隐匿性骨折诊断中的应用价值比较 [J]. **临床医学**, 2024, 44 ( 11 ) : 92-94.
- ZHANG Fangle, GUO Yongjie, CHEN Chong, *et al.* Comparison of application value of DR radiography and multi-slice spiral CT three-dimensional reconstruction in diagnosis of occult rib fractures[J]. **Clinical Medicine**, 2024, 44(11): 92-94.
- [35] 陈文龙, 曾祥鸿, 罗景胜. 老年股骨转子间骨折髓内钉固定中不同复位质量对临床预后的影响——基于影像学特征分析 [J]. **创伤外科杂志**, 2025, 27 ( 4 ) : 265-271.
- CHEN Wenlong, ZENG Xianghong, LUO Jingsheng. Effect of different reduction quality on clinical prognosis in intramedullary nail fixation of elderly intertrochanteric fractures—based on imaging feature analysis[J]. **Journal of Traumatic Surgery**, 2025, 27(4): 265-271.
- [36] 刘晨, 王健. 7 T 磁共振成像的临床应用优势、挑战及未来展望 [J]. **磁共振成像**, 2024, 15 ( 12 ) : 38-41, 47.
- LIU Chen, WANG Jian. Clinical application advantages, challenges, and future prospects of 7T MRI[J]. **Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging**, 2024, 15(12): 38-41, 47.