

## DXA、QCT、DECT应用于骨质疏松性椎体压缩性骨折内固定治疗的研究进展

黄敏华<sup>1,2</sup>, 叶志锋<sup>2</sup>, 刘志伟<sup>3,4</sup>, 黎松波<sup>1,3,4\*</sup>, 黎建文<sup>3,4</sup>, 卢健锋<sup>3,4</sup> (1. 广东医科大学, 广东湛江 524023; 2. 东莞市人民医院急诊科, 广东东莞 523000; 3. 东莞市人民医院脊柱骨科, 广东东莞 523000; 4. 东莞市骨科常见病基础、临床与数字化研究重点实验室, 广东东莞 523000)

**摘要:** 骨质疏松性椎体压缩性骨折(OVCFs)是一种中老年人常见的骨骼疾病,严重影响患者的生活质量和健康。在不稳定型OVCFs的治疗中,椎弓根螺钉内固定术能为椎体提供强力有效的支持,已成为重要的手术选择。然而,严重的骨质疏松会使内固定治疗失效率高。准确测量患者的骨密度评估骨质疏松情况对于手术成功和临床结果有较大影响。目前最常用的骨密度评估技术有双能X射线吸收法(DXA)、定量计算机断层扫描(QCT)和双能量CT(DECT)。该文综述了此3种技术在OVCFs的应用状况及优劣势的研究进展。

**关键词:** 骨质疏松性椎体压缩性骨折; 骨密度; 椎弓根螺钉内固定术

中图分类号: R 683.2; R 455.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-3610 (2024) 03-0323-06

## Advance in the application of DXA, QCT, and DECT in the internal fixation treatment of osteoporotic vertebral compression fractures

HUANG Min-hua<sup>1,2</sup>, YE Zhi-feng<sup>2</sup>, LIU Zhi-wei<sup>3,4</sup>, LI Song-bo<sup>1,3,4\*</sup>, LI Jian-wen<sup>3,4</sup>, LU Jian-feng<sup>3,4</sup> (1. Guangdong Medical University, Zhanjiang 524023, China; 2. Emergency Department, Dongguan People's Hospital, Dongguan 523000, China; 3. Spinal Orthopedics Department, Dongguan People's Hospital, Dongguan 523000, China; 4. Dongguan Key Laboratory of Basic, Clinical and Digital Research of Common Bone Diseases, Dongguan 523000, China)

**Abstract:** Osteoporotic vertebral compression fractures (OVCFs) are common skeletal disorders in the middle aged and elderly people, significantly affecting their quality of life and overall health. Among the treatments for unstable OVCFs, pedicle screw fixation can offer robust and effective support to the vertebral body and has become a crucial surgical option. However, severe osteoporosis can lead to a high failure rate of internal fixation treatment. Hence, the accurate measurement of a patient's bone density to assess osteoporotic conditions has great influence on surgical success and clinical outcomes. Currently, the most commonly used bone density assessment techniques include dual-energy x-ray absorptiometry (DXA), quantitative computed tomography (QCT), and dual-energy CT (DECT). This paper reviewed the application of these three techniques in OVCFs and the advantages and disadvantages thereof.

**Key words:** OVCFs; bone mineral density; pedicle screw fixation

骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fractures, OVCFs)指在原发性骨质疏松的情况下,由于椎体的骨密度和骨质量下降,骨的强度减弱,导致椎体的在轻微的外伤或甚至无明显外伤的状态下发生的压缩性骨折,是骨质疏松(Osteoporosis, OP)骨折中发病率最高且后果严重的疾病。由于椎体

的高度减少和背部的畸形均可能导致OVCFs患者的持续性背痛,继续发展可能影响患者的心肺和消化系统功能,也增加了脊柱和其他部位再次发生骨折的风险。当骨密度值每降低2个标准差,椎体压缩性骨折风险可增加4~6倍<sup>[1]</sup>。

目前,临床上对于表现出脊髓和神经受压的症

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(粤莞联合基金-地区培育项目)(2021B1515140056),东莞市社会发展科技项目(重点)(20221800906282)

作者简介: 黄敏华(1991-),男,在读硕士研究生, E-mail: 270854624@qq.com

通信作者: 黎松波,主任医师, E-mail: imsongbo0184@sina.com

状,有明显的背部畸形,以及那些不适宜进行微创手术的椎体骨折不稳定的OVCFs患者,椎弓根螺钉固定手术治疗是首选方法。骨密度的评估在手术规划和治疗决策过程中,有助于指导螺钉的选择及骨水泥的使用。目前的诊疗共识<sup>[2]</sup>除了建议行ERAS围手术期管理策略对患者进行全面评估,还建议骨折之前未曾行抗骨质疏松治疗的患者应根据评估结果及尽早开始抗骨质疏松治疗。由此可知,椎体骨密度的有效评估无论在老年人健康管理、骨质疏松监测管理、椎体骨折术前及术后评估都显得尤其重要。而影像学检查是骨密度测量的主要手段。目前最常用的骨密度评估技术有双能X射线吸收法(DXA)、定量计算机断层扫描(QCT)和双能量CT(DECT)。本文对此3种技术在OVCFs的应用状况及优劣势的研究进展作一综述。

## 1 OVCFs治疗中骨密度的影像学评估

目前,临床上骨密度(bone mineral density, BMD)测量的方案多为DXA、QCT,而较为前沿的DECT测量技术和通过人工智能(artificial intelligence, AI)结合影像学数据深度学习算法评估技术也正逐步优化骨密度的评估体系。程晓光等<sup>[3]</sup>通过对75 321人的多中心大样本调查后发现,全国骨质疏松症患者男性约1 000万人,女性约4 900万人;全国50岁以上人群中,男性骨质疏松症患病率为6.46%,女性为29.13%。而一项全球多中心研究指出,在65~80岁的绝经后女性中,有34%的椎体骨折未被及时诊断;而在60岁及以上的人群中,高达45%的椎体骨折在胸片检查时被遗漏;由于就诊率低和漏诊率高,仅有23%的脆性骨折患者得到了骨质疏松的评估和治疗<sup>[3]</sup>。研究表明,DXA测量不能准确评估骨质疏松症相关骨折的风险,而QCT在预测骨质疏松症相关骨折显示出优越的敏感性。DECT数据后处理获得的BMD值,用于评估2 a内有发生低能量骨折风险的患者,具有高灵敏度(85.45%)和特异性(89.19%)<sup>[4]</sup>。

### 1.1 DXA在骨密度测量的临床优势及局限性

诊断骨质疏松的“金标准”以DXA为主,测量决策为根据X射线衰减的原理,使2种不同能量的X射线穿透不同密度的软组织后(例如骨质、脂肪、肌肉及其混合物)能量衰减的程度不一,从而计算出其骨矿物质含量(bone mineral content, BMC),单位为克(g)<sup>[5-6]</sup>。通过计算测量感兴趣区的高度及宽度得出面积(Area)的二维空间,面积骨密度BMD=BMC/Area,单位为g/cm<sup>2</sup>。世界卫生组织(WHO)推荐临床上诊断

骨质疏松的金标准测量的感兴趣区为腰椎部(L1~L4)和双侧股骨颈部的骨密度<sup>[7-8]</sup>。该诊断方法自1987年引入双能X射线骨密度扫描仪后<sup>[9]</sup>,对骨质疏松的诊断、评估其转归和治疗随访监测起到积极的作用。但DXA在脊柱骨密度测量上有明显的局限性,即使脊柱为评定骨密度的最佳部位,但在评估椎体骨小梁的改变时由于后柱结构的掩盖,导致真正的椎体骨密度难以被反映出来。Wang等<sup>[10]</sup>在144个腰椎(L1~5)椎体样本中,分别计算椎体和后柱结构对整个脊椎BMC、骨体积的贡献,脊椎及各组分BMC和BMD的相关性加以比较分析,得出椎体对脊椎BMC的贡献为1/3,后柱结构贡献为2/3;椎体对脊椎骨体积贡献为2/3,后柱结构贡献为1/3,后柱结构为脊椎BMC和BMD测得值的主要贡献者。DXA所测得的脊柱骨密度可能更多的反映后柱结构,而不是脊柱外科医生想了解的椎体骨密度。而由于BMD的变化非常微弱和缓慢,导致对DXA的测量精度提出较高的要求,从而阐明了目前临床上DXA测定脊柱骨密度的局限性。但DXA体成分分析仍广泛应用于2型糖尿病、乳腺癌的风险评估以及肥胖症、HIV脂肪营养不良、慢性肾病的协助诊断等临床或科研工作中,也可以评估神经性厌食症、肥胖症、库欣综合征的治疗效果。

### 1.2 QCT在骨密度测量的临床优势及敏感性

1.2.1 QCT在骨密度测量的临床优势 随着CT技术被广泛应用及发展,断层扫面技术逐渐成为临床辅助诊断的常用工具。在不增加原来CT辐射量的基础下,对原有CT数据的后处理得出的骨密度可以突破DXA对于二维平面上的测量局限,通过感兴趣区的立体化个体选择,除了能更好地反映不同感兴趣区(骨皮质区或骨松质区)的真实骨矿物质含量,亦能为脊柱外科医师在处理骨质方面状况前提供更为准确的术中选择(例如内固定方案的决策)<sup>[10-11]</sup>。QCT是由美国加州大学旧金山分校(UCSF)放射科的Genant和Cann医师在1982年提出的一种利用临床CT机测量骨密度的方法。Hopson等<sup>[12]</sup>以绝经前乳腺癌患者作为研究对象,分别在其化疗前、化疗12个月后采用分辨力外周骨QCT(HR-pQCT)和DXA检查,其研究结果显示,患者化疗后的皮质骨密度、桡骨和胫骨远端的总骨密度均较化疗前降低,且胫骨的面积和皮质厚度均较化疗前减少,胫骨松质骨的面积较化疗前稍有增加,说明临床可通过HR-pQCT进一步观察人体的骨微结构,且可将其作为骨质疏松的预警工具。QCT在系统算法支持下测量,不仅可以通过体模校正以保障各仪器间

骨密度测量结果的一致性,还可以进一步测量感兴趣区的体积骨密度(vBMD),将骨组织在三维空间的分布展示出来,避免出现骨密度重叠情况<sup>[13]</sup>。与DXA相比,QCT只需要一台CT扫描设备、一套校正体模及对应的分析软件,在无需额外接受更多的辐射剂量和花费更多的检查时间下,便可以完成对感兴趣区的骨密度测量时,患者的接受度相对较高<sup>[14]</sup>。目前我国医学上QCT的诊断标准初步以腰椎骨密度测量为标准,参照《中国定量CT骨质疏松症诊断指南(2018)》<sup>[15]</sup>中的诊断标准。近年来,由于无需同步扫描体模的技术突破,例如异步外部校准QCT以及无体模校准QCT,使得在恒定校准CT设备稳定扫描的情况下实现校准体模与受检者扫描能在非同一时空进行,使得机会性QCT的应用更为广泛,有望成为OP机会性筛查的新兴技术。

**1.2.2 QCT应用于骨质疏松诊断的敏感性** 大量的医学研究结果显示,与DXA相比,QCT在骨质疏松的诊断中具有较高的诊断效能<sup>[16-18]</sup>。在刘雪峰等<sup>[18]</sup>的研究中,QCT对老年类风湿关节炎患者骨质疏松症的检出率为53.4%,明显高于DXA的43.8%,且QCT诊断的ROC曲线下面积为0.945,灵敏度为93.75%,特异度为87.80%,由此可知,与DXA相比,QCT在老年类风湿关节炎骨质疏松的诊断中具有较高的检出率、灵敏度和特异性。在吴良雨<sup>[19]</sup>的研究中,与以DXA作为中老年人骨质疏松诊断的金标准相比,QCT在骨质疏松中的诊断准确率为96.30%,骨量减少的诊断准确率为96.77%,骨量正常的诊断准确率为100.00%,总诊断准确率为97.00%,由此可知,QCT与DXA金标准的诊断率相比无明显差异,可为临床诊断骨质疏松提供有效依据。在苗辉等<sup>[20]</sup>的研究中,通过对绝经后妇女采用DXA和QCT测量腰椎骨密度,其研究结果显示,QCT的检出率为45.9%,明显高于DXA的26.4%,该研究认为,二者检出率不一致的原因与患者自身的脊柱退行性变、腹主动脉钙化及其他硬化性病变等情况密切相关,上述情况会致使DXA测量的骨密度上升,从而降低其检出率,由此可知,与DXA相比,QCT在绝经后妇女骨质疏松中的敏感性较高。不仅如此,有临床研究证实,QCT与其他影像学技术或实验室指标联合诊断骨质疏松,可以有效提高该疾病的诊断效能<sup>[21]</sup>。在邓闽军等<sup>[22]</sup>的研究中,通过QCT测量合并脊柱侧弯的骨质疏松性骨折患者的骨密度,并根据测量数据选择合适的脊柱侧弯凹侧进行穿刺,使得患者在

进行椎体成形术时获益,其研究结果显示,术前使用QCT检测可以确保在术中有效改善患者的脊柱侧弯,提高其脊柱的稳定性和手术安全性。

### 1.3 DECT在OVCFs的临床优势与差异性

**1.3.1 DECT在骨密度测量的临床优势** 近年来,由于CT技术的飞速发展及人们健康医疗要求的提高,随着DECT的普及,人们可以在利用临床检查或体检的机会,对获取的常规DECT数据进行额外的BMD测量,从而避免进一步的射线暴露和降低医疗费用;同时它还无需医疗机构增添额外的软件及系统,也免除了需要体模校正数据的日常维护工作。DECT技术能够在单次扫描中收集两种不同能量的数据,利用不同物质在不同能量下的吸收特性,实现物质的分离和识别。虚拟平扫技术就是目前临床上通过去除增强图像的碘图获得的。而该原理,对于其他一些高原子序数的物质同样适用,例如钙。因而通过虚拟平扫技术分离骨组织中的骨矿物质则能获得钙值图,实现定量测量椎体里的BMD。

**1.3.2 DECT与QCT的差异性** 近期有研究结果表明,DECT在评估骨髓损伤或骨髓水肿方面具有很好的敏感性及特异性<sup>[23]</sup>,其主要是通过物质分离原理后处理去钙后获得的骨髓图评估。而通过区分和定量钙、水和脂肪等物质,为骨组织钙含量的定量分析及体积骨密度的测定提供了新的可能性。此外,能谱CT和双源CT作为CT技术的新趋势,利用双层探测器、结合高低能量快速切换或双球管技术,进一步提高了物质成分的区分和定量能力<sup>[24]</sup>。Zhou等<sup>[25]</sup>通过对128名受试者结果作线性回归分析,研究表明DECT在骨密度的测量与QCT测量结果具有很好一致性和相关性。Wang等<sup>[26]</sup>通过多元回归分析分析了使用DECT测量的羟基磷灰石水和羟基磷灰石脂肪以及使用QCT测量的BMD之间的关系,表明DECT对比QCT可以准确、精确地测量骨密度。Qin等<sup>[27]</sup>通过将离体股骨头进行分别使用DECT与DXA和QCT测量的BMD进行比较,得出DECT衍生的vBMD表现出高度一致性和可靠性特征,在校准后,它也表现出高度的准确性。而临床上,准确骨密度的评估对OVCFs中不同手术方案的选择尤其重要。近年来,利用DECT物质分离技术重建韧带等关节支撑结构的软组织特性,协助骨折中韧带等软组织的解剖定位和病理检测,有研究认为可代替MRI诊断急性期韧带损伤,这无疑对诊断韧带损伤提供了一个新的方法和思路<sup>[28]</sup>。

## 2 骨密度评估对于内固定治疗在OVCFs中的临床应用

### 2.1 骨密度评估对于微创手术治疗中骨水泥的临床应用

聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethylmethacrylate, PMMA) 作为目前临床常用的骨水泥, 其强度远高于椎体松质骨, 其主要的优势是能够迅速固化并提供即时的结构支持。同时研究表明椎体骨密度与骨水泥渗透情况存在相关性。Xie等<sup>[29]</sup>指出, 当椎体骨密度增加时, 注射骨水泥所遇到的阻力会增大, 因此需要更大的力量来推动骨水泥进入椎体。这是因为高骨密度意味着单位体积内有更多的骨小梁和更小的间隙, 所以在注射同样体积的骨水泥时, 需要更大的空间, 从而增加了渗漏的风险。Zhong等<sup>[30]</sup>在对241例椎间隙骨水泥渗漏的风险因素进行研究时也发现, 椎体的CT值与骨水泥渗漏的风险呈正相关。但Lin等<sup>[31]</sup>持有不同的观点, 他们认为, 椎体骨密度较低时, 骨水泥在椎体内的扩散速度更快, 更容易造成渗漏。而Hong等<sup>[32]</sup>的研究则表明, 骨密度与骨水泥渗漏之间没有明显的关联。因此, 关于骨密度是否能作为预测骨水泥渗漏的指标, 目前尚无明确结论, 仍需进一步探讨。

### 2.2 骨密度评估对于椎弓根螺钉固定治疗中骨水泥的临床应用

在严重骨质疏松的患者中, 由于骨密度降低明显, 椎弓根螺钉的固定可能不够稳固, 增加了螺钉松动或拉出的风险。为了增强螺钉的固定力, 在椎弓根螺钉固定治疗中, 骨水泥经常被用作辅助材料, 通过螺钉的孔道中注入骨水泥, 增强螺钉与骨之间的结合, 从而提高固定的稳定性。Huang等<sup>[33]</sup>通过有限元分析, 计算并记录了手术段和相邻段的活动范围 (ROMs) 和刚度, 发现骨密度较低的患者在OLIF手术后邻近段的活动性补偿加剧, 增加了ASD的风险。Peng等<sup>[34]</sup>通过对59例单节段峡部裂性滑脱合并骨质疏松脊柱患者行腰椎后路融合术进行大于2a的随访研究中, 发现是否应用骨水泥加强型椎弓根螺钉内固定对于螺钉松动、术后邻近节段骨折、术后感染、术后翻修等方面差异无统计学意义。因此, 合适的骨水泥应用方案能极大改善患者的预后及生活质量。

### 2.3 骨密度测量对于椎弓根螺钉固定治疗的重要性

骨密度是决定椎弓根螺钉固定稳定性的关键因素。骨质疏松增加了手术风险, 如螺钉松动、骨折和骨水泥泄漏。通过术前骨密度测量, 医生可以预测螺钉的固定稳定性, 并据此选择最合适的固定策略。对于

严重骨质疏松的患者, 可能需要使用骨水泥增强的椎弓根螺钉固定等特殊的固定技术, 从而得以更好地评估手术风险, 并据此制定手术策略、预测手术效果。手术后, 患者可能需要进行骨密度治疗, 如服用骨折预防药物, 定期进行骨密度测量也可以帮助医生监测治疗效果, 并据此调整治疗方案。于滨生等<sup>[35]</sup>在对25例离体样本进行研究时, 比较了双皮质骶骨椎弓根螺钉固定与使用PMMA强化的单皮质骶骨椎弓根螺钉固定的锚定强度, 他们指出, 在较高骨密度和较低骨密度时两者锚定强度同等, 而BMD值为0.60~0.69 g/cm<sup>2</sup>时使用PMMA强化的样本锚定强度更好, 从而认为腰椎BMD检查可指导更优的内固定方案。高明暄等<sup>[36]</sup>对12个离体椎体进行了实验, 根据骨密度的百分比标准将其分为4个不同的组别, 在同一骨密度层次上, 他们使用Magerl方法在椎体的双侧分别植入了24枚椎弓根螺钉评估最大的拔出力、刚性和能量吸收值, 结果显示, 随着骨密度的减少, 螺钉的稳定性也逐渐降低, 这表明在骨质疏松、严重骨质疏松等情况下, 椎弓根螺钉的稳定性会大幅度下降, 因此这种情况仅单纯使用普通椎弓根螺钉 (conventional pedicle screw, CPS) 固定可能存在很大的失效风险, 特别是在固定强度要求较高且严重骨质疏松的情况下, 直接使用椎弓根螺钉可能无法达到预期的矫形固定效果。高明暄等<sup>[37]</sup>认为骨量减少和骨质疏松时选用膨胀式椎弓根螺钉 (expensive pedicle screw, EPS) 内固定是安全的, 注射型可降解骨水泥 (injectable absorbable bone cement, IABC) 强化钉道可以进一步提高螺钉 (包括膨胀螺钉) 的内固定强度。

## 3 结语

在OVCFs的诊断过程中, QCT可以准确反映其椎体横断面的实际情况, 比DXA更能精准检测其骨密度。而DECT可以评估骨髓水肿, 同时也有能减少金属伪影对测量结果影响的优点, 但目前暂无与其有关的骨质疏松诊断标准, 故临床上仍将QCT作为较准确的诊断及评估手段, 通过术前骨密度测量预测椎弓根螺钉内固定术的稳定性。而对于是否需根据不同骨密度状态下决定同时使用骨水泥进行加强, 迄今也暂无量化标准, 所以仍是脊柱医生在制定手术方案中需要讨论的重点。而关于在不用骨密度状态下骨水泥的应用方案, 国内外暂无指南及共识, 但随着QCT、DECT测量骨密度的技术普及和研究的继续深入, 以及近年来飞速发展的AI技术将广泛应用于医学影像的分析

与诊断中,我们相信将能为OVCFs患者提供更加准确和更具个性化的椎体固定方案,从而改善预后,提高患者的生活质量。

### 参考文献:

- [1]ALSOOF D, ANDERSON G, MCDONALD C L, et al. Diagnosis and management of vertebral compression fracture[J].*Am J Med*, 2022, 135(7): 815-821.
- [2]中国康复医学会骨质疏松预防与康复专业委员会.骨质疏松性椎体压缩骨折诊治专家共识(2021版)[J].*中华医学杂志*, 2021, 101(41): 3371-3379.
- [3]程晓光,董剩勇,王亮,等.应用双能X线骨密度仪调查中国人群骨密度水平和骨质疏松症患病率[J].*中华健康管理学杂志*, 2019(1): 51-58.
- [4]BOOZ C, NOESKE J, ALBRECHT M H, et al. Diagnostic accuracy of quantitative dual-energy CT-based bone mineral density assessment in comparison to Hounsfield unit measurements using dual x-ray absorptiometry as standard of reference[J].*Eur J Radiol*, 2020, 132: 109321.
- [5]SALZMANN S N, OKANO I, JONES C, et al. Thoracic bone mineral density measured by quantitative computed tomography in patients undergoing spine surgery[J].*Spine J*, 2021, 21(11): 1866-1872.
- [6]YUAN Y, ZHANG P, TIAN W, et al. Application of bone turnover markers and DXA and QCT in an elderly Chinese male population[J].*Ann Palliat Med*, 2021, 10(6): 6351-6358.
- [7]ZENG Q, LI N, WANG Q, et al. The prevalence of osteoporosis in China, a nationwide, multicenter DXA survey[J].*J Bone Miner Res*, 2019, 34(10): 1789-1797.
- [8]WANG P, SHE W, MAO Z, et al. Use of routine computed tomography scans for detecting osteoporosis in thoracolumbar vertebral bodies[J].*Skeletal Radiol*, 2021, 50(2): 371-379.
- [9]GENANT H K, ENGELKE K, FUERST T, et al. Noninvasive assessment of bone mineral and structure: State of the art[J].*J Bone Miner Res*, 2009, 11(6): 707-730.
- [10]WANG Y, VIDEMAN T, BOYD S K, et al. The distribution of bone mass in the lumbar vertebrae: Are we measuring the right target?[J].*Spine J*, 2015, 15(11): 2412-2416.
- [11]LINK T M. Osteoporosis imaging: State of the art and advanced imaging[J].*Radiology*, 2012, 263(1): 3-17.
- [12]HOPSON M B, ONISHI M, AWAD D, et al. Prospective study evaluating changes in bone quality in premenopausal women with breast cancer undergoing adjuvant chemotherapy[J].*Clin Breast Cancer*, 2020, 20(3): e327-e333.
- [13]赵君祿,任庆云,陈凯希,等.两种QCT骨密度测量软件检测腰椎骨密度的比较[J].*中国骨质疏松杂志*, 2022, 28(9): 1272-1276.
- [14]王玲,查晓娟,杜霞,等.中国人群定量CT椎体骨密度正常参考数据库及与BMI、年龄的相关性:基于中国健康定量CT大数据队列研究[J].*中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志*, 2022, 15(1): 36-42.
- [15]程晓光,王亮,曾强,等.中国定量CT(QCT)骨质疏松症诊断指南(2018)[J].*中国骨质疏松杂志*, 2019, 25(6): 733-737.
- [16]苏浩浩,贾庆卫,张新焕,等.双能X线和定量CT对2型糖尿病患者骨质疏松的诊断价值分析[J].*中国矫形外科杂志*, 2021, 29(17): 1579-1581.
- [17]张羽,张宗军,刘许慧,等.胸椎定量CT和腰椎双能X线吸收检测仪对绝经后女性骨质疏松症的诊断差异[J].*放射学实践*, 2022, 37(10): 1205-1210.
- [18]刘雪峰,伦晓名,郁万江,等.QCT与DXA对老年类风湿关节炎患者骨质疏松症诊断价值的对比研究[J].*中国骨质疏松杂志*, 2021, 27(4): 475-480.
- [19]吴良雨.定量CT在中老年人群骨质疏松诊断中的应用价值[J].*现代医用影像学*, 2022, 31(8): 1447-1449.
- [20]苗辉,蒋萍,姜振凯,等.QCT与DXA对绝经后妇女骨质疏松症检出率的对比[J].*昆明医科大学学报*, 2022, 43(4): 55-61.
- [21]姜文蓁,张宇威,崔效楠,等.胸部低剂量CT结合定量CT测量下段胸椎骨密度诊断骨质疏松[J].*中国医学影像技术*, 2022, 38(5): 734-738.
- [22]邓闯军,孙振国,翁伟,等.腰椎定量CT在合并脊柱侧弯的骨质疏松性骨折行椎体成形术的应用价值[J].*中国骨伤*, 2021, 34(11): 1077-1082.
- [23]王平,和建伟,黄刚,等.应用双能CT与定量CT对椎体骨密度测量的对照研究[J].*中国骨质疏松杂志*, 2017, 23(2): 159-162.
- [24]程晓光,徐文坚,吴艳,等.骨质疏松的影像学与骨密度诊断专家共识[J].*中国骨质疏松杂志*, 2020, 26(9): 1249-1256.
- [25]ZHOU S, ZHU L, YOU T, et al. In vivo quantification of bone mineral density of lumbar vertebrae using fast kVp switching dual-energy CT: Correlation with quantitative computed tomography[J].*Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(1): 341-350.
- [26]WANG M, WU Y, ZHOU Y, et al. The new fast kilovoltage-switching dual-energy computed tomography for measuring bone mineral density[J].*Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(2): 801-811.
- [27]QIN L, HUANG J, YU P, et al. Accuracy, agreement, and reliability of DECT-derived vBMD measurements: An initial ex vivo study[J].*Eur Radiol*, 2021, 31(1): 191-199.
- [28]吴剑宏,罗倩,张蕾,等.双源双能量CT扫描在锁骨远端骨折中的应用研究[J].*中华肩肘外科电子杂志*, 2022, 10(1): 55-58.
- [29]XIE W, JIN D, MA H, et al. Cement leakage in percutaneous vertebral augmentation for osteoporotic vertebral compression fractures: Analysis of risk factors[J].*Sci Rep*, 2016, 29(4): E171-176.
- [30]ZHONG B Y, HE S C, ZHU H D, et al. Nomogram for

- predicting intradiscal cement leakage following percutaneous vertebroplasty in patients with osteoporotic related vertebral compression fractures[J]. *Pain Physician*, 2017, 20(4): E513-E520.
- [31] LIN J, QIAN L, JIANG C, CHEN X, et al. Bone cement distribution is a potential predictor to the reconstructive effects of unilateral percutaneous kyphoplasty in OVCFs: A retrospective study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2018, 13(1): 140.
- [32] HONG S J, LEE S, YOON J S, et al. Analysis of intradiscal cement leakage during percutaneous vertebroplasty: Multivariate study of risk factors emphasizing preoperative MR findings[J]. *J Neuroradiol*, 2014, 41(3): 195-201.
- [33] HUANG C Y, ZHANG Z F, ZHANG X Y, et al. Poor bone mineral density aggravates adjacent segment's motility compensation in patients with oblique lumbar interbody fusion with and without pedicle screw fixation: An in silico study[J]. *Front Surg*, 2022, 9: 967399.
- [34] PENG J C, GUO H Z, ZHAN C G, et al. Comparison of pedicle screw fixation with or without cement augmentation for treating single-segment isthmic spondylolisthesis in the osteoporotic spine[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 827.
- [35] 于滨生, 郑召民, 庄新明, 等. 骨质疏松程度对骶骨椎弓根螺钉固定的生物力学影响[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2009, 19(10): 740-744.
- [36] 高明暄, 周胜虎, 邓晓文, 等. 骨质疏松对椎弓根螺钉稳定性影响的实验研究[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2013, 19(1): 39-42.
- [37] 高明暄, 李旭升, 甄平, 等. 膨胀螺钉及钉道强化在骨质疏松椎体中的力学可靠性研究[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2014, 16(6): 521-526.

(责任编辑: 刘建滔)