

· 综述 ·

骨质疏松症评估方法的研究进展[△]

欧宇轩, 李根, 朱立新, 郑欣

(南方医科大学珠江医院, 广东广州 510280)

摘要: 骨质疏松症主要是由于骨量丢失与降低、骨组织微结构破坏、骨脆性增加而引起的、容易导致骨折的一种全身代谢性骨病, 它是影响我国中老年人骨骼健康的重要隐患。如何准确评估并及时预防骨质疏松症至关重要, 近几年越来越多的学者关注于各种影像检查技术对骨质疏松症的评估, 包括双能 X 线、计算机断层扫描、定量超声、磁共振成像等技术, 本文对骨质疏松症评估的研究进展进行综述, 为临床医生提供参考。

关键词: 骨质疏松症, 双能 X 线, 定量超声, 计算机断层扫描, 磁共振成像

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 05-0417-05

Research progress in osteoporosis assessment methods // OU Yu-xuan, LI Gen, ZHU Li-xin, ZHENG Xin. Department of Spine Surgery, Zhujiang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510280, China

Abstract: Osteoporosis (OP), a systemic metabolic bone disease with characteristics of bone loss and bone mass reduction, with bone tissue microstructure destruction and increase of bone fragility that is prone to fracture, is an important hidden danger affecting the bone health in the middle-aged and elderly people in China. Accurate assessment is crucial for prevent and treatment of OP. In recent years, more and more scholars have paid attention to the research of osteoporosis by various imaging techniques, including dual-energy X-ray, computed tomography, quantitative ultrasound, magnetic resonance imaging and other technologies. In this article the research progress regarding OP assessments is reviewed to provide a reference for clinicians.

Key words: osteoporosis, dual-energy X-ray, quantitative ultrasound, computed tomography, magnetic resonance imaging

随着人口老龄化日益严峻, 许多高危群体对骨质疏松症的认识和预防不足, 导致骨质疏松症的患病率快速增加, 并且已经成为了一个不可忽视的全球性的健康挑战。骨质疏松症在早期并没有明显的症状, 不易察觉, 而后期容易发生骨折, 导致生活质量下降。管理骨质疏松症的主要目标是预防这些骨折, 称为脆性或低创伤性骨折, 因为它们为疾病发病率和死亡率的主要来源。尽管在骨折风险评估方面取得了重大进展, 并且有一系列降低骨折风险的药物选择, 但许多高危个体没有得到充分的检查和治疗^[1]。因此及早进行骨密度 (bone mineral density, BMD) 监测, 对预防和早期诊断骨质疏松具有十分重要的意义。

1 评估方法

1.1 双能 X 线吸收法 (dual energy X-ray absorptiom-

etry, DXA)

DXA 经济、简便, 辐射量小, 准确度高, 是目前临床诊断骨质疏松症的“金标准”^[2]。进行全身骨密度检查时, 只需十多分钟, 而且抗干扰能力强, 稳定性好, 所得到的影像精度及分辨率高。低剂量的辐射让 DXA 重复检测变为可能, 从而能够验证所得到的数据。它通过两个部位、3 个感兴趣区测定股骨颈、转子间、髋关节 3 个区域及第 1~4 腰椎 (L₁₋₄) 的 BMD, 采用 T 值评估, 如果 T 值为 -2.5~-1.0, 为骨量减少; T \geq -1.0, 则为正常, T \leq -2.5, 为骨质疏松症^[3]。然而, DXA 的 T 值不适合作为诊断骨质疏松的唯一因素, 因为双能 X 线吸收法很容易受到外部环境和自身条件的影响。Xu 等^[4]发现脊柱侧凸及后凸畸形、脊柱退行性改变、主动脉钙化和轻度骨折都会引起 DXA 所测得的 BMD 增加, 从而导致结果的不准确。Yeh 等^[5]认为在骨质疏松早期, 最先出

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2024.05.06

[△]基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (编号: 82272523); 国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 81902244)

作者简介: 欧宇轩, 硕士研究生在读, 研究方向: 脊柱外科, (电话) 19886185296, (电子信箱) oyx1262191233@163.com

* 通信作者: 郑欣, (电话) 020-62782575, (电子信箱) drzhengxin@163.com

现丢失的是小梁骨而不是皮质骨，而 DXA 无法把皮质骨和松质骨区分开来，而且容易受到周围其他组织的影响，降低了 DXA 的敏感性。由于它是一种二维技术，无法测量骨深度，因此使用 DXA 测量的面积 BMD 会受到骨骼大小变化的影响，且骨微组织对骨强度有一定的影响，却不影响 BMD，这可能会导致误诊^[6]。同时人体的厚度或体重也会对 DXA 测得的 BMD 产生一定的影响，对于肥胖患者诊断的准确性会降低。其次，由于 DXA 诊断标准采用的是 T 值，它依赖于 DXA 仪器设置的正常参考资料库，而各设备制造商所设置的 T 值基准资料库是不一样的，而且 T 评分是达到峰值骨量后骨质流失的量度。所以对于儿童、50 岁以下的男性、绝经期前阶段的女性需要参考 Z 值^[7]，通过缩放原始测量（以 g/cm^3 为单位）来实现，以便描述远离总体均值的标准差。Z 值是把相同年龄段的人群所测得的 BMD 值进行比较， $Z\text{-score} \leq -2.0$ 被认为是骨质疏松症，而 $Z\text{-score} > -2.0$ 被认为正常^[8]，随着年龄的增长，可能会发生大量的骨质流失，导致老年人的平均 BMD 值较低。因此，成人 Z 值应大于或等于他们各自的 T 值，随着时间的推移，个人的 T 值会随着骨量丢失而下降，而他们的 Z 值可能不会改变^[9]。Z 评分表示测量的 BMD 结果与年龄、性别、种族和体重匹配的规范数据库不同的标准差数。由于 Z 评分反映了人口统计学上相似人群的差异，因此它比 T 评分更加准确^[10]。DXA 是一种多功能技术，在骨质疏松症和其他骨骼疾病的临床实践中被广泛使用。这是一种安全且廉价的程序，可测量骨矿物质密度以诊断骨质疏松症、评估骨折风险和监测骨质疏松症治疗。然而，大部分人声称它被过度利用，对患者管理没有帮助。近年来，尽管人口老龄化，骨折风险增加，但基于办公室的 DXA 设施数量有所下降，进行的 BMD 测试减少，被诊断和治疗骨质疏松症的女性也减少了^[11]。随着各种新兴的影像学检测技术的崛起，DXA 的地位受到了挑战，从而对良好的患者护理构成威胁。需要尽快恢复 DXA 在骨质疏松症管理中的适当作用。

1.2 定量超声法 (quantitative ultrasound, QUS)

QUS 是一种廉价、便携式的技术，无创无辐射，在筛查骨质疏松方面的潜力较大^[12]。早在 1984 年 Langton 等就首次将 QUS 用于骨质疏松症和骨折风险评估。QUS 有多种模式，包括横向传输、轴向传输、反向散射和脉冲回波。所有这些模式将超声在骨骼中的传播路径简化为一个简单的物理模型，然后计算某些参数以评估骨矿物质密度。在 QUS 的所有参

数中，声速是最常用的参数之一，通过考虑骨骼微观结构与 QUS 参数之间的关系，骨质疏松症骨的 QUS 参数变化可能大于健康骨。然而，目前的 QUS 方法不能为骨质疏松症提供令人满意的诊断准确性，主要原因之一是声音在其表面的骨骼和软组织中的传播比简化的物理模型要复杂得多^[13]。其次，当前 QUS 分析采用的有限参数会丢失超声信号中与 BMD 相关的大量其他信息。Luo 等^[14]建立了一种提高 QUS 诊断精度的新方法，即多通道卷积神经网络处理 QUS 的原始射频信号，这种方式的精确性和诊断性都高于传统的声速测量。Yen 等^[15]认为，虽然 QUS 不是诊断骨质疏松症的金标准，但 QUS 和 DXA 之间存在明显的相关性，QUS 可作为代替 DXA 的预筛选工具。QUS 设备在其站点和制造商方面的可变性也会导致其测量的可变性。这种异质性反映在现有证据中，并阻碍了其在临床实践中的广泛应用。人们普遍认为，跟骨 QUS 可用于骨质疏松症筛查和骨折风险评估，其临床用途已经相当成熟。跟骨 QUS 作为骨质疏松症的筛查方法，具有良好的特异性，当跟骨的 QUS T 评分为 -1.8 时，对骨质疏松症的诊断效率最高；当跟骨的 QUS T 评分为 ≤ -2.35 时，可诊断为骨质疏松症^[16]。Minniti 等^[17]研究表明，由于经 DXA 诊断的每例真阳性病例的成本比 QUS+DXA 诊断高出两倍，所以合理的把 QUS 运用在评估骨质疏松中，可以起到事半功倍的效果。今后还需要继续进一步研究足跟以外部位的 QUS 参数，使其更为广泛的应用于骨质疏松症的评估。

1.3 常规 CT

常规 CT 扫描可同时评估容量骨矿物质密度和骨质疏松症筛查，无需额外设备、患者时间或辐射暴露，且无需大量额外费用^[18]。在常规的胸部、腹部和骨盆 CT 扫描中，CT 能清晰地看到脊椎部位，从而为骨质疏松症的诊断提供了充足的可能。Löffler 等^[19]发现在脊柱常规 CT 检查中进行骨质疏松筛查是可行的。与 DXA 相比，CT 测量可以更好地识别患有脊椎骨折骨量减少的个体。骨质疏松患者的 CT 检查可以见到骨小梁变细、减少、间隙增宽、皮质骨变薄、周围骨质退变等现象。CT 测量受脊柱退行性疾病、血管钙化、脊柱侧弯和脊柱后凸等畸形、肥胖误差、患者定位错误以及各种内部和外部伪影的影响较小^[20]。DXA 易受脊柱周围解剖结构和椎体退行性变的影响，此外，虽然骨小梁是椎体代谢最活跃的部分，但在使用 DXA 时不能区分骨皮质和骨小梁，均可导致测量数据不准确。而常规 CT 可以很好地弥补

DXA 的这两个缺点^[21]。通过 CT 扫描直接进行 HU 测量可用于骨质疏松症筛查,有文献表明椎体的 CT 值与 BMD 和 T 值存在较好的相关性,CT 值的改变能反映出骨量的改变,可作为早期的 BMD 筛选指标^[22]。然而,各研究得出的腰椎 CT 值诊断骨质疏松症的界值有所不同,仍需要进一步更大样本量的研究来获得更明确的骨质疏松诊断标准。CT 同样可以测量出皮质骨的厚度,不仅可以用来评估骨质疏松还能评估骨质疏松骨折的风险。陈华芳等^[23]研究发现,股骨颈、转子间皮质骨厚度值及 CT 值均可较好地评估髋部骨折的风险,其中外侧皮质厚度的变化具有重要意义。

1.4 定量计算机断层扫描法 (quantitative computed tomography, QCT)

QCT 是一种新兴的 BMD 测量技术,它将临床 CT 扫描数据通过体模校正,从而获得人体三维骨骼密度和体积的定量评估。相比于 DXA 检测的二维骨骼密度, QCT 很大程度上避免了脊柱压缩性骨折以及动脉硬化等因素对骨质疏松检测的影响,受退行性脊柱变化的干扰较小,对骨量变化的敏感性很高^[24]。同时,身高、体重等因素对于 QCT 测量 BMD 的影响较小,可以更精确地诊断骨质疏松症。QCT 能较精确地测定皮质骨和松质骨的密度,根据其密度判断是否存在骨量损失,从而对骨质疏松进行早期诊断^[25]。QCT 衍生的体积 BMD 也被证明可以区分椎体骨折患者和没有骨折的患者^[26],除了体积 BMD 之外,还可以确定横截面惯性矩和皮质骨厚度等。对于使用椎体 CT 值直接进行筛选,目前还没有公认的标准,一般认为腰椎 QCT 诊断阈值: $BMD < 80 \text{ mg/cm}^3$ 是骨质疏松, $80 \text{ mg/cm}^3 \leq BMD \leq 120 \text{ mg/cm}^3$ 是低骨量, $BMD > 120 \text{ mg/cm}^3$ 则是骨量正常^[27]。然而,相关阈值随人群患骨质疏松风险的不同而变化,对于那些患有基础疾病的高危人群,应采用较高的敏感性阈值,以将假阴性的可能性降到最低。QCT 不受受试者体型大小和骨骼大小的影响,而且可以提供更详细的骨骼几何结构参数,例如骨小梁微结构的测量,总体优于 DXA,但由于其高辐射量,一般不作为首选^[28]。QCT 测量又分为双能 QCT 和单能 QCT, Cataño 等^[29]将 54 例椎体,分别用单能 QCT (120 kVp) 和双能 QCT (80/140 kVp) 进行扫描,然后用 DXA 扫描椎骨并进行力学测试,以获得骨骼特性。结果显示,与单能 QCT 比较,双能 QCT 测量的体积 BMD 与椎体骨质疏松程度有较好的相关性,可以更精确地评估骨丢失量,随时间的变化,能更精确地诊

断出骨质疏松症。Cheng 等^[30]调查显示,50 岁以上的妇女有 29.0% 患有骨质疏松,与 DXA 所报道的 29.1% 相近。但是,对于 50 岁以上的男性, QCT 检测出的骨质疏松发生率比 DXA 高出 1 倍以上 (13.5% vs 6.5%)。基于以上的研究,他们认为 QCT 对骨质疏松症的检测要比 DXA 更灵敏。QCT 在最近几年也成为一种常见的诊断骨质疏松的手段。然而,它的费用很高,而且大部分医院都没有专门的 QCT。

1.5 高分辨率外周计算机断层扫描 (high-resolution peripheral quantitative computed tomography, HR-pQCT)

HR-pQCT 与 QCT 的区别在于其高分辨率图像,能够定性、定量测量体内骨小梁的厚度、数量和分布,以及胫骨和桡骨的皮质孔隙率,因此类似于外周骨的虚拟骨活检^[31]。HR-pQCT 与 QCT 相比,骨质疏松患者的皮质区域,可更清晰地显示其明显的骨量丢失。它也可以测量外周部位的三维容积 BMD 以及皮质和骨小梁微结构,从而弥补了 DXA 不能将皮质骨和松质骨的 BMD 区分开来的局限性。但是骨组织矿化的变化会影响 HR-pQCT 获得的形态学测量。骨结构的提取使用固定阈值技术,因此可能无法捕获低于阈值的矿化不足的骨组织^[32],使得测量结果不准确。HR-pQCT 越来越多地用于评估继发性骨质疏松症和代谢性骨疾病的骨微结构和骨强度,以探索这些疾病背后的病理生理学机制。HR-pQCT 在临床实践中的前景有待从药物作用、代谢性骨病、罕见骨病以及手关节成像和骨折愈合等其他应用等方面进一步研究^[33]。

1.6 磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)

早在上世纪九十年代, MRIT2 加权和高分辨率骨小梁成像就被用于评价骨质疏松的骨显微组织。MRI 主要通过量化脂肪含量来评估骨质疏松症,随着年龄的增长,椎体骨髓内水含量会持续下降,而脂肪含量会增加。当骨量降低和骨微结构被破坏时,骨小梁变稀疏甚至缺失。小梁间的空隙主要被脂肪组织所填充,因此能够通过提取骨髓脂肪部分来定量评估非矿化骨室^[34]。骨骼和肌肉中的脂肪是相关的,在骨质疏松症的患者中,有更多的脂肪倾向于在骨与肌肉组织中聚集。通过 MRI 扫描,测量双侧椎旁肌肉横截面积、肌肉间隙脂肪组织,并计算标准化肌肉间隙脂肪组织评估各测量值之间的相关性,可以得出椎旁肌肉肌间脂肪变性程度与 BMD 呈负相关^[35]。MR 光谱 (MRS) 可提供有关组织分子组成的信息。氢质子磁共振波谱常被用于研究体内骨髓的甘油三酯化学成分,骨质疏松症和骨质减少症患者中骨髓脂质含量升

高。由于骨髓中的脂质峰值通常在氢质子磁共振波谱, 在光谱分析中可以可靠地评估重叠的脂质峰。如果可以识别和测量来自单个脂质峰的信号贡献, 氢质子磁共振波谱还可以评估骨质疏松症中发生的脂质成分变化^[36]。随着年龄的增长和骨质疏松症的进展, 骨骼会出现结构和生理上的变化, 从而导致骨髓中的脂肪含量升高, 骨髓灌注减少, 骨髓密度下降, 小梁微结构变差, 而皮质骨的含水率也随之下降。由于这些变化会影响骨组织中的扩散过程, 因此弥散 MRI 是识别表征衰老和骨质疏松症中骨质的有效工具。与定性传统核磁共振成像不同, 它提供定量指标, 与 MRS 相比, 它具有更好的空间分辨率, 因此具有更高的信噪比, 可快速采集。通过获取内部磁场梯度的扩散, 可以实现小梁骨微结构的结构可视化^[37]。磁共振成像能诊断骨质疏松, 但是存在一定的局限性, 检查费用也比较昂贵, 因此, 在临床应用中不作为主要的检查手段。通常作为一种鉴别诊断的手段, 用来排除骨折、BMD 降低等表现不是由肿瘤造成的。

2 小 结

综上所述, 本文从 BMD 的测量、骨小梁结构、椎体的 CT 值、骨髓的脂肪含量等方面对骨质疏松症进行评估, 各种影像学检测方法有优点也有不足之处。相信随着检测技术的进步, 未来会有更有效的早期诊断骨质疏松的工具出现, 从而有助于临床早期预防和治疗骨质疏松症。

参考文献

- [1] Compston JE, McClung MR, Leslie WD. Osteoporosis [J]. *Lancet*, 2019, 393 (10169) : 364–376. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)32112-3.
- [2] Rinonapoli G, Ruggiero C, Meccariello L, et al. Osteoporosis in men: a review of an underestimated bone condition [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22 (4) : 2105. DOI: 10.3390/ijms22042105.
- [3] Fuggle NR, Curtis EM, Ward KA, et al. Fracture prediction, imaging and screening in osteoporosis [J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2019, 15 (9) : 535–547. DOI: 10.1038/s41574-019-0220-8.
- [4] Xu XM, Li N, Li K, et al. Discordance in diagnosis of osteoporosis by quantitative computed tomography and dual-energy X-ray absorptiometry in Chinese elderly men [J]. *J Orthop Translat*, 2019, 18: 59–64. DOI: 10.1016/j.jot.2018.11.003.
- [5] Yeh PS, Lee YW, Chang WH, et al. Biomechanical and tomographic differences in the microarchitecture and strength of trabecular and cortical bone in the early stage of male osteoporosis [J]. *PLoS One*, 2019, 14 (8) : e0219718. DOI: 10.1371/journal.pone.0219718.
- [6] Golding PH. Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) to measure bone mineral density (BMD) for diagnosis of osteoporosis – experimental data from artificial vertebrae confirms significant dependence on bone size [J]. *Bone Rep*, 2022, 17: 101607. DOI: 10.1016/j.bonr.2022.101607.
- [7] Khalatbari H, Binkovitz LA, Parisi MT. Dual-energy X-ray absorptiometry bone densitometry in pediatrics: a practical review and update [J]. *Pediatr Radiol*, 2021, 51 (1) : 25–39. DOI: 10.1007/s00247-020-04756-4.
- [8] Ebeling PR, Nguyen HH, Aleksova J, et al. Secondary osteoporosis [J]. *Endocr Rev*, 2022, 43 (2) : 240–313. DOI: 10.1210/endo/rev/bnab028.
- [9] Williams S, Khan L, Licata AA. DXA and clinical challenges of fracture risk assessment in primary care [J]. *Cleve Clin J Med*, 2021, 88 (11) : 615–622. DOI: 10.3949/ccjm.88a.20199.
- [10] Mäkitie O, Zillikens MC. Early-onset osteoporosis [J]. *Calcif Tissue Int*, 2022, 110 (5) : 546–561. DOI: 10.1007/s00223-021-00885-6.
- [11] Lewiecki EM, Binkley N, Bilezikian JP. Stop the war on DXA [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2018, 1433 (1) : 12–17. DOI: 10.1111/nyas.13707.
- [12] Najafi M, Najafi M, Keshtkar AA, et al. QUS characteristics in normal population: a mini review and our experience [J]. *J Diabetes Metab Disord*, 2022, 21 (2) : 1635–1640. DOI: 10.1007/s40200-022-01113-0.
- [13] Chen Z, Luo W, Zhang Q, et al. Osteoporosis diagnosis based on ultrasound radio frequency signal via multi-channel convolutional neural network [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2021, 2021 : 832–835. DOI: 10.1109/EMBC46164.2021.9629546.
- [14] Luo W, Chen Z, Zhang Q, et al. Osteoporosis diagnostic model using a multichannel convolutional neural network based on quantitative ultrasound radiofrequency signal [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2022, 48 (8) : 1590–1601. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2022.04.005.
- [15] Yen CC, Lin WC, Wang TH, et al. Pre-screening for osteoporosis with calcaneus quantitative ultrasound and dual-energy X-ray absorptiometry bone density [J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1) : 15709. DOI: 10.1038/s41598-021-95261-7.
- [16] Li C, Sun J, Yu L. Diagnostic value of calcaneal quantitative ultrasound in the evaluation of osteoporosis in middle-aged and elderly patients [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2022, 101 (2) : e28325. DOI: 10.1097/MD.00000000000028325.
- [17] Minniti D, Davini O, Gualano MR, et al. Techniques for diagnosing osteoporosis: a systematic review of cost-effectiveness studies [J]. *Int J Technol Assess Health Care*, 2014, 30 (3) : 273–281. DOI: 10.1017/S0266462314000257.
- [18] Cheng X, Zhao K, Zha X, et al. Opportunistic screening using low-dose ct and the prevalence of osteoporosis in china: a nationwide, multicenter study [J]. *J Bone Miner Res*, 2021, 36 (3) : 427–435. DOI: 10.1002/jbmr.4187.

- [19] Löffler MT, Jacob A, Scharf A, et al. Automatic opportunistic osteoporosis screening in routine CT: improved prediction of patients with prevalent vertebral fractures compared to DXA [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31 (8) : 6069–6077. DOI: 10.1007/s00330-020-07312-8.
- [20] Lenchik L, Weaver AA, Ward RJ, et al. Opportunistic screening for osteoporosis using computed tomography: state of the art and argument for paradigm shift [J]. *Curr Rheumatol Rep*, 2018, 20 (12) : 74. DOI: 10.1007/s11926-018-0784-7.
- [21] 姚倩倩, 李娟, 朱春雨, 等. 胸腰椎椎体 CT 值对骨质疏松骨折预测意义 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (10) : 943–946. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.10.18.
Yao QQ, Li J, Zhu CY, et al. Significance of CT value of thoracolumbar vertebral body in predicting osteoporotic fracture [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (10) : 943–946. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.10.18.
- [22] Li YL, Wong KH, Law WM, et al. Opportunistic screening for osteoporosis in abdominal computed tomography for Chinese population [J]. *Arch Osteoporos*, 2018, 13 (1) : 76. DOI: 10.1007/s11657-018-0492-y.
- [23] 陈华芳, 李珊珊, 郭兴满, 等. 老年人髋部骨折股骨近端骨质 CT 测量的意义 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (18) : 1706–1708. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.18.18.
Chen HF, Li SS, Guo XM, et al. CT measurement of proximal femoral bone quality for evaluation of hip fractures in the elderly [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (18) : 1706–1708. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.18.18.
- [24] Aggarwal V, Maslen C, Abel RL, et al. Opportunistic diagnosis of osteoporosis, fragile bone strength and vertebral fractures from routine CT scans: a review of approved technology systems and pathways to implementation [J]. *Ther Adv Musculoskelet Dis*, 2021, 13: 1759720X211024029. DOI: 10.1177/1759720X211024029.
- [25] Sakka SD, Cheung MS. Management of primary and secondary osteoporosis in children [J]. *Ther Adv Musculoskelet Dis*, 2020, 12: 1759720X20969262. DOI: 10.1177/1759720X20969262.
- [26] Lee Y, Ogihara N, Lee T. Assessment of finite element models for prediction of osteoporotic fracture [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019, 97: 312–320. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.05.018.
- [27] Subramaniam RM, Kurth DA, Waldrip CA, et al. American college of radiology appropriateness criteria: advancing evidence-based imaging practice [J]. *Semin Nucl Med*, 2019, 49 (2) : 161–165. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2018.11.011.
- [28] 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. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.17.09.
Su HH, Jia QW, Zhang XH, et al. Diagnostic value of dual energy X-ray absorptiometry and quantitative CT for osteoporosis in type 2 diabetes mellitus [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (17) : 1579–1581. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.17.09.
- [29] Cataño Jimenez S, Saldarriaga S, Chaput CD, et al. Dual-energy estimates of volumetric bone mineral densities in the lumbar spine using quantitative computed tomography better correlate with fracture properties when compared to single-energy BMD outcomes [J]. *Bone*, 2020, 130: 115100. DOI: 10.1016/j.bone.2019.115100.
- [30] Cheng X, Zhao K, Zha X, et al. Opportunistic screening using low-dose CT and the prevalence of osteoporosis in China: a nationwide, multicenter study [J]. *J Bone Miner Res*, 2021, 36 (3) : 427–435. DOI: 10.1002/jbmr.4187.
- [31] Lim MJ, Kang KY. A contemporary view of the diagnosis of osteoporosis in patients with axial spondyloarthritis [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2020, 7: 569449. DOI: 10.3389/fmed.2020.569449.
- [32] Whittier DE, Boyd SK, Burghardt AJ, et al. Guidelines for assessment of bone density and microarchitecture in vivo using high-resolution peripheral quantitative computed tomography [J]. *Osteoporos Int*, 2020, 31 (9) : 1607–1627. DOI: 10.1002/jbmr.141.
- [33] van den Bergh JP, Szulc P, Cheung AM, et al. The clinical application of high-resolution peripheral computed tomography (HR-pQCT) in adults: state of the art and future directions [J]. *Osteoporos Int*, 2021, 32 (8) : 1465–1485. DOI: 10.1007/s00198-021-05999-z.
- [34] Sollmann N, Löffler MT, Kronthaler S, et al. MRI-based quantitative osteoporosis imaging at the spine and femur [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2021, 54 (1) : 12–35. DOI: 10.1002/jmri.27260.
- [35] 孔祥臻, 王增, 于兴明, 等. 椎旁肌肉脂肪变性性与骨质疏松性状态相关性 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (16) : 1471–1475. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.16.07.
Kong XZ, Wang Z, Yu XM, et al. Correlation between paravertebral muscle fatty degeneration and lumbar osteoporotic state [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (16) : 1471–1475. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.16.07.
- [36] Singh S, Bray TJP, Hall-Craggs MA. Quantifying bone structure, micro-architecture, and pathophysiology with MRI [J]. *Clin Radiol*, 2018, 73 (3) : 221–230. DOI: 10.1016/j.crad.2017.12.010.
- [37] Fathi Kazerooni A, Pozo JM, McCloskey EV, et al. Diffusion MRI for assessment of bone quality: a review of findings in healthy aging and osteoporosis [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 51 (4) : 975–992. DOI: 10.1002/jmri.26973.

(收稿:2023-02-09 修回:2023-10-07)
(同行评议专家: 马涛, 吴继彬)
(本文编辑: 宁桦)