Modern Practical Medicine, December 2025, Vol. 37, No. 12

·基层园地·

人工智能 CT 骨密度测量在骨质疏松诊断中的价值研究

何志平，葛永林

【关键词】 人工智能；计算机断层扫描；骨质疏松；骨密度；双能 X 线吸收法
doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.12.023
【中图分类号】 R68 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-0800(2025)12-1298-04

骨质疏松症作为一种以骨量降低、骨微结构破坏为特征的全身性骨骼疾病，已成为全球性的公共卫生挑战[1]。骨质疏松性骨折是骨质疏松症最严重的后果，全球每 3 秒发生 1 例脆性骨折[2]。双能 X 线吸收法（DXA）是目前骨质疏松诊断的“金标准”，因其测量精度高、辐射剂量低而被广泛采用，但存在设备成本高、难以在基层医疗机构普及辐射暴露等问题[3]。传统计算机断层扫描（CT）具有高空间分辨率及三维重建能力，测量骨密度普及率高，但传统 CT 值与骨密度的换算缺乏统一标准，误差较大，未被广泛用于骨质疏松诊断[4]。近年来，人工智能（AI）技术在影像学分析领域取得了迅速发展，基于光谱 CT 的 AI 系统通过对大量 CT 图像数据的学习和分析，自动精准识别骨骼区域并提取骨密度相关特征，进而实现快速准确诊断骨骼疾病。本研究旨在评估 AI-CT 骨密度测量与双能 DXA 在骨质疏松诊断中的一致性，并分析 AI-CT 诊断骨质疏松症的最佳阈值，现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取 2025 年 1−6 月在杭州市富阳区第三人民医院就诊且疑似骨质疏松症或因其他疾病进行腹部或胸部 CT 检查患者 216 例，其中男 89 例，女 127 例；年龄 50 ～ 85 岁，平均（65.4±8.4）岁。纳入标准：（1）同期（间隔≤30 d）接受 CT 检查及双能 DXA 骨密度检测；（2）因疑似骨质疏松症就诊，进行 CT 扫描，扫描范围至少包含一个腰椎椎体（$L_{1\sim5}$）；（3）具有完整的 DICOM 格式 CT 图像及 DXA 报告。排除标准：（1）CT 图像存在运动伪影、金属植入物伪影；（2）恶性肿瘤骨转移、甲状旁腺功能亢进症、肾性骨营养不良者；（3）近 6 个月内使用双膦酸盐、特立帕肽等抗骨质疏松药物者；（4）长期（＞ 3 个月）糖皮质激素治疗者；（5）腰椎或髋部手术史者。本研究获得杭州市富阳区第三人民医院医学伦理委员会批准，免除知情同意。

1.2 方法

1.2.1 DXA 检查 采用美国通用电气公司生产的 Lunar Prodigy 型双能 X 线骨密度仪（型号：Prodigy Pro Compact，设备序列号：671313MA）进行测量。检查前，患者去除身上金属物品，仰卧于检查床上，保持身体放松、体位正确。腰椎扫描时屈膝垫高使腰部平贴检查床，扫描中心线对齐髂嵴上 3 cm，范围覆盖 T_{12} 椎体上缘至 L_4 椎体下缘。扫描过程中要求患者保持静止呼吸，系统自动识别 $L_{1\sim4}$ 椎体间隙并生成各椎体感兴趣区（ROI），见图 1。髋部扫描采用足部固定架内旋患肢，扫描中心定位于股骨颈中点，范围包括股骨大转子至小转子下 1 cm。系统自动识别股骨颈、全髋及 Ward 三角区 ROI，优先选取骨密度值更低的单侧髋关节。所有扫描由持有 ISCD 认证的技师操作，遵循 ALARA 原则。根据世界卫生组织（WHO）[5]推荐的标准计算 T 值，T 值≤−2.5 为骨质疏松，−2.5 ＜ T 值＜−1.0 为骨量减少，T 值≥−1.0 为骨量正常。

1.2.2 AI-CT 骨密度测量 采用人工智能骨密度测量系统（OsteoAI-QCT，版本号 v3.1.0，深睿医疗）进行测量。该系统基于改进的 U-Net 网络开发，腰椎分割 Dice 系数为 0.987，体积骨密度（vBMD）预测与

作者单位： 311400 杭州，杭州市富阳区第三人民医院
通信作者： 葛永林，Email：hzfyzp8882025@163.com

QCT 标准品相关系数 R^2=0.98。具体测量流程如下：将包含至少一个腰椎椎体（$L_{1\sim5}$）的 DICOM 格式 CT 图像（扫描参数：层厚 1 ～ 2 mm，管电压 120 kV，管电流自动调制 80 ～ 250 mAs，重建算法 B30f）导入该系统。AI 自动精准分割腰椎（$L_{1\sim4}$），剔除皮质骨区域，保留松质骨 ROI。为提高一致性，本研究统一选取 L_3 椎体松质骨区域，通过线性回归模型将 CT 值转换为 vBMD，并自动生成结构化报告，见图 2。

1.3　观察指标　（1）确定 AI-CT 骨密度测量诊断骨质疏松症的阈值，并计算相应的敏感度、特异度；（2）评估 AI-CT 与 DXA 对骨质疏松诊断结果的一致性（*Kappa* 值）；（3）比较不同性别 DXA 测量 T 值及 AI-CT 骨密度测量值差异；（4）分析 AI-CT 骨密度测量值与 DXA 测量 T 值的相关性；（5）比较骨量正常组、骨量减少组和骨质疏松组 AI-CT 骨密度测量值差异；（6）通过 Bland-Altman 分析评价两种测量方法所得数值的一致性界限；（7）比较不同腰椎椎体（$L_{1\sim5}$）CT 值的差异性，并分析各椎体与 T 值的相关性。

1.4　统计方法　采用 SPSS 24.0 统计软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料用均数±标准差表示，两组比较采用独立样本 *t* 检验；计数资料以例数和百分比表示，组间对比采用 χ^2 检验。采用受试者工作特征曲线分析 AI-CT 骨密度诊断骨质疏松的效能；采用 Bland-Altman 分析评估 AI-CT 骨密度测量值与 DXA 测量 T 值的一致性，计算均值差及 95% 一致性界限。P ＜ 0.05 表示差异有统计学意义。

2　结果

2.1　AI-CT 骨密度诊断骨质疏松的阈值　以 DXA 为“金标准”，AI-CT 诊断骨质疏松的最佳阈值为 98.75 mg/cm³（总体人群），此时敏感度 92.31%，特异度 89.47%，曲线下面积为 0.951（95%*CI*：0.925 ～ 0.981），AI-CT 诊断不同性别骨质疏松的曲线下面积分别为 0.932（男性）、0.967（女性），见表 1。

2.2　AI-CT 诊断骨质疏松效能　AI-CT 对骨质疏松的正确识别率为 91.8%（56/61），假阳性率 3.4%（2/58），见表 2。与 DXA 的诊断一致性（*Kappa*=0.812，P ＜ 0.05）。

2.3　不同性别患者 T 值及 AI-CT 骨密度测量值比较　女性的 T 值及 AI-CT 骨密度测量值均显著低于男性，差异均有统计学意义（均 P ＜ 0.05），见表 3。

2.4　AI-CT 骨密度与 T 值相关性　总体、男性及女性人群中 AI-CT 骨密度与 T 值均呈正相关（r=0.855、0.821、0.873，均 P ＜ 0.05）。

2.5　不同骨密度分级患者 AI-CT 测量值比较　骨质疏松组患者 AI-CT 骨密度明显低于骨量减少组和骨量正常组，差异均有统计学意义（均 P ＜ 0.05），见表 4。

2.6　Bland-Altman 一致性分析　AI-CT 骨密度测量值与 DXA 测量 T 值在总体、男性及女性人群中一致性方面均表现良好，见表 5。

2.7　不同椎体 CT 值比较　不同椎体间 CT 值差异有统计学意义（F=15.32，P ＜ 0.05），L_3 椎体的 CT 值变异系数最小（*CV*=8.2%），且与 T 值的相关性最高（r=0.861，P ＜ 0.05），见表 6。

3　讨论

骨质疏松症的早期诊断是预防脆性骨折的关键。DXA 作为诊断骨质疏松症的“金标准”，存在设备成本高、基层普及难等局限[6]；而传统 CT 虽普及率高，但骨密度换算缺乏统一标准，临床应用受限[7]。AI 技术与 CT 结合的 AI-CT 骨密度测量，为骨质疏松诊断提供了新路径。

表 1　AI-CT 骨密度诊断骨质疏松的受试者工作特征曲线分析

分组	阈值（mg/cm³）	敏感度（%）	特异度（%）	曲线下面积（95%*CI*）
总体	98.75	92.31	89.47	0.951（0.925 ～ 0.981）
男性	110.50	90.00	88.24	0.932（0.882 ～ 0.980）
女性	95.20	93.55	90.20	0.967（0.930 ～ 0.990）

注：AI 为人工智能，CT 为计算机断层扫描

表 2　AI-CT 与 DXA 骨质疏松诊断一致性分析　例

AI-CT 诊断	DXA 诊断			合计
	骨质疏松	骨量减少	骨量正常	
骨质疏松	56	8	2	66
骨量减少	3	85	9	97
骨量正常	2	4	52	58
合计	61	97	58	216

注：AI 为人工智能，CT 为计算机断层扫描，DXA 为双能 X 线吸收法

表 3　不同性别患者 T 值及 AI-CT 骨密度测量值比较

性别	例数	T 值	AI-CT 骨密度（mg/cm³）
男性	89	−1.85±0.62	112.34±18.75
女性	127	−2.35±0.51	89.67±22.13
t 值		6.484	7.882
P 值		＜ 0.05	＜ 0.05

注：AI 为人工智能，CT 为计算机断层扫描

表 4　不同骨密度分级患者的 AI-CT 测量值比较　mg/cm³

组别	例数	AI-CT 骨密度
骨量正常	58	132.46±16.82
骨量减少	97	102.37±14.25
骨质疏松	61	78.93±12.06
F 值		205.50
P 值		＜ 0.05

AI 为人工智能，CT 为计算机断层扫描

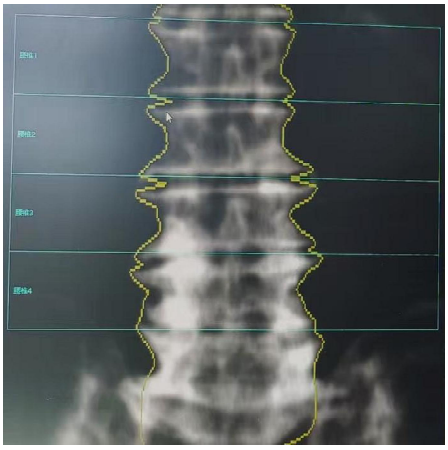
表 5　Bland-Altman 一致性分析

分组	均值差	95%一致性界限下限	95%一致性界限上限
总体	0.152	−1.965	2.267
男性	0.184	−2.051	2.412
女性	0.139	−1.856	2.115

表 6　$L_{1\sim5}$ 椎体 CT 值及 T 值相关性（*n*=216）

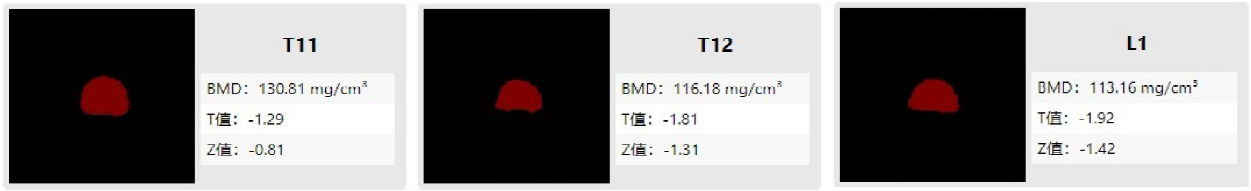
椎体	CT 值（HU）	与 T 值相关性（*r*）
L_1	125.6±22.4[a]	0.832
L_2	128.3±20.1	0.845
L_3	130.8±18.9	0.861
L_4	127.5±21.6[a]	0.838
L_5	123.2±24.8[a]	0.819

注：与 L_3 比较，a*P* ＜ 0.05



注：1 位 88 岁男性患者的腰椎 $L_{1\sim4}$ 骨密度检测报告。L_1 椎体：骨密度（BMD）=1.06 g/cm²，T 值=−0.6（骨量正常）；L_2 椎体：BMD=1.18 g/cm²，T 值=−0.3（骨量正常）；L_3 椎体：BMD=1.30 g/cm²，T 值=0.9（骨量正常）；L_4 椎体：BMD=1.42 g/cm²，T 值=2.8（骨量正常）

图 1　双能 X 线吸收法测量腰椎 $L_{1\sim4}$ 骨密度报告示例



注：患者男性，脊柱 CT 骨密度综合评估为 122.70 mg/cm³，T 值−1.58，属于正常骨密度范围（T≥−1.0）

图 2　人工智能（AI）-计算机断层扫描（CT）测量正常骨密度报告示例

本研究发现，女性的 T 值及 AI-CT 骨密度测量值均显著低于男性（均*P*＜ 0.05），这提示 AI-CT 诊断模型需纳入性别变量以提升精准度，与 DXA 诊断的性别分组实践一致。女性骨密度低于男性，可能与女性绝经后雌激素水平急剧下降、骨吸收速率加快密切相关，而男性雄激素水平下降平缓，骨量丢失较慢[8]。

本研究发现，AI-CT 骨密度测量值与 T 值在总体、男性及女性人群中均呈显著正相关（*r*=0.855、0.821、0.873，均 *P* ＜ 0.05），且 Bland-Altman 分析显示两者总体均值差仅 0.152 mg/cm³，表明两种方法具有高度一致性[9]。基于改进 U-Net 网络的 AI 系统可实现腰椎松质骨 98.7%精准分割，自动剔除皮质骨及血管钙化干扰[10]，通过线性回归模型将 CT 值转换为 vBMD，与 QCT 相关性达 R^2≥0.97[11]。对于已接受胸腹部 CT 检查的患者，AI-CT 可同步完成骨密度评估，避免重复辐射及额外检查成本，尤其适合基层医疗机构筛查[12]。

不同骨密度分级患者的 AI-CT 测量值呈现显著递减趋势（*P* ＜ 0.05），即骨质疏松组＜骨量减少组＜骨量正常组，与骨质疏松的病理进程相符[13]。AI-CT 通过体素级分析捕捉骨微结构细节，相比 DXA 的面积骨密度，更能反映松质骨代谢状态[14]，不仅可用于诊断，还能为病情进展评估提供量化依据。

本研究 ROC 曲线分析确定 AI-CT 诊断骨质疏松的最佳阈值为 98.75 mg/cm³（*AUC*=0.951），敏感度 92.31%、特异度 89.47%，且性别特异性阈值（男性 110.50 mg/cm³、女性 95.20 mg/cm³）进一步提升诊断效能。该阈值高于传统 CT 的 80 mg/cm³，原因在于 AI 系统的高精度分割减少了干扰因素，提高了 vBMD 计算准确性[15]。此外，本研究发现 L_3 椎体 CT 值变异系数最小（8.2%），与 T 值相关性最高（*r*=0.861），故统一采用 L_3 椎体作为测量标准，减少了椎体选择不一致导致的诊断偏差[16-17]。

综上所述，AI-CT 骨密度测量与 DXA 在骨质疏

松诊断中具有高度一致性，经阈值优化后诊断效能优异，且具备普及性强、无额外辐射、可同步评估等优势，有望成为 DXA 的重要补充。未来需进一步探索 vBMD 与 aBMD 的转换标准，验证其在骨折风险预测及动态监测中的价值，推动骨质疏松诊疗的数字化转型。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参　考　文　献

[1] 章振林,岳华.原发性骨质疏松症诊疗指南(2022 版)要点解析[J].内科急危重症杂志,2024,30(4):289-293.

[2] SCHWARCZ Y, YANOVER C, ROUACH V, et al. Non-osteoporotic fractures are associated with increased risk of subsequent major osteoporotic fractures[J]. Osteoporos Int, 2024, 35(10): 1839-1847.

[3] ZAMAN M U, FATIMA N. Dual energy X-ray absorptiometry (DXA) in the management of osteoporosis[J]. J Coll Physicians Surg Pak, 2024, 34(6): 633-635.

[4] YANG Y, LIAO F, XING X B, et al. The reduced cortical bone density in vertebral bodies: Risk for osteoporotic fractures? Insights from CT analysis[J]. J Orthop Surg Res, 2024, 19(1): 486.

[5] CORTET B, GUANABENS N, BRANDI M L, et al. Similarities and differences between European guidelines for the management of postmenopausal osteoporosis[J]. Arch Osteoporos, 2024, 19(1): 84.

[6] 史明艳,刘改乐,郭彦杰.基于人工智能(AI)的低剂量 CT 检查对良恶性肺结节的鉴别诊断研究[J].临床医学工程,2025,32(1):49-52.

[7] 梁冬云,周建军,曾蒙苏,等.基于 AI 的 CT 定量分析对 20 mm 以下非典型磨玻璃结节肺腺癌浸润性的预测价值[J].临床放射学杂志,2024,43(1):57-62.

[8] SALARI N, GHASEMI H, MOHAMMADI L, et al. The global prevalence of osteoporosis in the world: A comprehensive systematic review and meta-analysis[J]. J Orthop Surg Res, 2021, 16(1): 609.

[9] LI Z, CHEN J R, YANG J, et al. Relationship between paraspinal muscle properties and bone mineral density based on QCT in patients with lumbar disc herniation[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2024, 25(1): 360.

[10] 刘军,赵文哲.人工智能技术在临床医学领域的应用与实践[J].中华医学信息导报,2025(9):14.

[11] 焦自梅,王曦,刘钦鹏,等.人工智能辅助机会性测量腰椎骨密度研究:与定量 CT 比较[J].中国 CT 和 MRI 杂志,2024,22(5):161-163.

[12] 谢雨芯,周素伊,梅好,等.人工智能辅助机会性 CT 与双能 X 线骨密度检测在 2 型糖尿病和非糖尿病患者骨量评估中的比较研究[J].重庆医学,2024,53(24):3700-3705.

[13] PISUCHPEN N, SRINIVAS RAO S, NODA Y, et al. Artificial intelligence (AI) and CT in abdominal imaging: Image reconstruction and beyond[J/OL]. Abdom Radiol, 2025.[2025-07-20].https://link.springer.com/article/10.1007/s00261-025-05031-6/metrics.

[14] DU X H, WEI H, LI P, et al. Artificial intelligence (AI) assisted CT/MRI image fusion technique in preoperative evaluation of a pelvic bone osteosarcoma[J]. Front Oncol, 2020, 10: 1209.

[15] 郝辉,朱书萌,赵文哲,等.不同重建算法对定量 CT 椎体骨密度测定准确性的影响[J].中国医学影像学杂志,2023,31(10):1090-1095.

[16] ZHONG X L, TANG Y H, ZENG G H, et al. Correlation between bone mineral density and different types of modic changes in lumbar spine[J]. Curr Med Imaging, 2025, 21: e15734056368021.

[17] 王雄毅,潘盛,王一可,等.胸椎松质骨 CT 值对骨质疏松症的预测价值[J].中国骨质疏松杂志,2024,30(4):530-537.

收稿日期:2025-08-21

(本文编辑:孙海儿)

· 编读往来 ·

关于论文写作中的作者署名

1　署名的意义　(1)标明论文的责任人，文责自负。(2)医学论文是医学科技成果的总结和记录，是作者辛勤劳动的成果和创造智慧的结晶，也是作者对医学事业作出的贡献，并以此获得社会的尊重和承认的客观指标，是应得的荣誉，也是论文排版权归作者的一个声明。(3)作者署名便于编辑、读者与作者联系，沟通信息，互相探讨，共同提高。作者姓名在文题下按序排列，排序应在投稿时确定，在编排过程中不应再做更改；作者单位名称及邮政编码脚注于同页左下方。

2　作者应具备下列条件　(1)参与选题和设计，或参与资料的分析和解释者。(2)起草或修改论文中关键性理论或其他主要内容者。(3)能对编辑部的修改意见进行核修，在学术界进行答辩，并最终同意该文发表者。以上 3 条均需具备。仅参与获得资金或收集资料者不能列为作者，仅对科研小组进行一般管理者也不宜列为作者。其他对该研究有贡献者应列入致谢部分。对文章中的各主要结论，均必须至少有 1 位作者负责。在每篇文章的作者中需要确定 1 位能对该文全面负责的通信作者。通信作者应在投稿时确定，如在来稿中未特殊标明，则视第一作者为通信作者。第一作者与通信作者不是同一人时，在论文首页脚注通信作者姓名、单位及邮政编码。作者中如有外籍作者，应附本人亲笔签名同意在本刊发表的函件。集体署名的论文于文题下列署名单位，于文末列整理者姓名，并于论文首页脚注通信作者姓名、单位和邮政编码。集体署名的文章必须将对该文负责的关键人物列为通信作者。通信作者只列 1 位，由投稿者决定。

本刊编辑部