

论 著

人工智能辅助机会性测量腰椎骨密度研究：与定量CT比较

焦自梅¹ 王 曦² 刘钦鹏¹
刘凤杰³ 戴政君⁴ 张国伟^{1,*}

1.烟台市烟台山医院影像科

(山东 烟台 264000)

2.济南市第二人民医院影像科

(山东 济南 250000)

3.烟台毓璜顶医院影像科

(山东 烟台 264000)

4.慧影医疗科技(北京)股份有限公司

科研部 (北京 100192)

【摘要】目的 本研究旨在比较人工智能(AI)定量CT辅助诊断系统与定量CT(QCT)在胸部低剂量CT检查时机会性测量腰椎骨密度的一致性。方法 选择2022年6月至2022年12月在我院因各种临床适应症行胸部低剂量CT检查的受检者作为研究对象,应用AI定量CT辅助诊断系统与QCT分别在胸部低剂量CT图像上测量受检者腰椎平均体积骨密度(vBMD),绘制散点图、Bland-Altman图检验二者的关系,计算Pearson相关系数评价其一致性。结果 AI定量CT辅助诊断系统测量vBMD平均值为 $116.38 \pm 36.07 \text{ mg/cm}^3$, QCT测量vBMD平均值为 $115.60 \pm 38.07 \text{ mg/cm}^3$,线性回归分析与Bland-Altman分析显示二者对腰椎骨密度的测量具有良好的一致性,二者呈显著正相关(相关系数 r 为0.977)。不同性别中,AI定量CT辅助诊断系统与QCT对腰椎骨密度的测量亦呈显著正相关。结论 AI定量CT辅助诊断系统与QCT基于胸部低剂量CT机会性测量腰椎vBMD具有高度一致性。

【关键词】 人工智能; 骨密度; 体层摄影术;
X线计算机

【中图分类号】 R445.3

【文献标识码】 A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.05.051

Artificial Intelligence-assisted Opportunistic Measurement of Lumbar Vertebra Bone Mineral Density: Comparison with Quantitative CT

JIAO Zi-mei¹, WANG Xi², LIU Qin-peng¹, LIU Feng-jie³, DAI Zheng-jun⁴, ZHANG Guo-wei^{1,*}.

1.Department of Radiology, Yantai Shan Hospital, Yantai 264000, Shandong Province, China

2.Department of Radiology, Jinan Second People's Hospital, Jinan 250000, Shandong Province, China

3.Department of Radiology, Yantai Yuhuangding Hospital, Yantai 264000, Shandong Province, China

4.Department of Scientific Research, Huiying Medical Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100192, China

ABSTRACT

Objective To compare the consistency of artificial intelligence (AI)-assisted quantitative CT diagnosis system and quantitative CT (QCT) in opportunistic measurement of lumbar vertebra bone density based on chest low-dose CT examination. **Methods** Subjects who accepted chest low-dose CT examination from June 2022 to December 2022 for various clinical indications were selected. AI-assisted quantitative CT diagnostic system and QCT were used to measure the average lumbar volume bone mineral density (vBMD). Scatter plot and Bland-Altman plot were drawn to test their relationship, and Pearson correlation coefficient was calculated to evaluate their consistency. **Results** The AI-assisted quantitative CT diagnostic system exhibited a mean vBMD of $116.38 \pm 36.07 \text{ mg/cm}^3$, and the QCT exhibited a mean vBMD of $115.60 \pm 38.07 \text{ mg/cm}^3$. Linear regression analysis and Bland-Altman analysis showed that the measurement of lumbar vertebrae BMD had good consistency, and there was a significant positive correlation between them ($r=0.977$). There was also a significant positive correlation between the AI-assisted quantitative CT diagnosis system and QCT in different genders. **Conclusion** AI-assisted quantitative CT diagnosis system has a good consistency with QCT opportunistic measurement of lumbar vBMD based on low dose chest CT.

Keywords: Artificial Intelligence; Bone Mineral Density; Tomography; X-ray Computer

骨质疏松导致的脊柱压缩性骨折非常常见,给社会和经济带来严重的负担,因此临床上对骨质疏松症的关注日益增加^[1-2]。双能X线骨密度测量(dualenergy X-ray absorptiometry, DXA)与定量CT(quantitative computed tomography, QCT)是腰椎骨密度(bone mineral density, BMD)的常用测量方法^[3-4]。然而,DXA需要额外设备和辐射,且在一些医院的使用受到限制。QCT机会性筛查骨质疏松不需要增加患者额外的检查及辐射剂量,但需要购买体模并定期校准。此外,通过CT数据人工测量腰椎BMD需要大量工作,限制了扩大骨质疏松症的人群筛查范围^[5]。

近年来,随着医学人工智能(artificial intelligence, AI)的广泛开展,基于影像图像的自动分隔、测量和诊断得到了快速发展^[6-8],提高了操作的可重复性,并节约了大量的人力成本,使得回顾性大规模基于CT图像的自动腰椎BMD测量成为现实。本研究旨在利用AI定量CT辅助诊断系统自动测量胸部低剂量CT(low-dose CT, LDCT)图像上的腰椎体积骨密度(volumetric bone mineral density, vBMD),并与QCT进行一致性比较,探讨其在机会性腰椎BMD测量中的价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究回顾性纳入了2022年6月至2022年12月在烟台市烟台山医院接受胸部LDCT检查联合QCT腰椎BMD测量的受检者337例,其中,女性139名,男性198名,年龄50~85(59.70 ± 7.82)岁。研究对象包括6例乳腺癌术后胸部CT复查患者,1例强直性脊柱炎患者,以及其他肺结节筛查或复查的患者,其中偶然发现1例腰椎椎体压缩性骨折。本研究经烟台市烟台山医院伦理委员会批准(烟山伦准2023048号)。

纳入标准:受检者年龄>50岁;胸12-腰2至少两个椎体可进行骨密度测量;胸部低剂量CT与QCT检查同时进行;CT重建图像连续且层厚 $\leq 1.25 \text{ mm}$ 。排除标准:胸12-腰2椎体存在肿瘤性、囊性或硬化性病变;椎体有手术病史;图像存在伪影影响椎体结构。

1.2 CT数据采集 受检者胸部低剂量CT扫描在Philips inisive CT power或Philips inisive CT上完成。扫描时受检者采取仰卧位,双手上举,吸气后屏住呼吸进行扫描,扫描范围为胸廓入口至L2椎体下缘水平。低剂量CT扫描参数:管电压为120kVp,管电流为自动毫安秒技术,螺距1,旋转时间0.75s,FOV 500mm,矩阵 512×512 ,重建层厚为1-1.25mm。

1.3 定量CT测量腰椎vBMD 将原始胸部LDCT扫描图像从Philips工作站传至QCT Pro Model 4骨密度测量系统(mindways software, Inc.)进行腰椎vBMD测量,取腰1、腰2椎体中心位置勾画感兴趣区并分别测量相应的vBMD(mg/cm^3),最终记录平均vBMD,若腰1或

【第一作者】焦自梅,女,主治医师,主要研究方向:人工智能影像诊断。E-mail: ytsjzm@126.com

【通讯作者】张国伟,男,主任医师,主要研究方向:骨关节影像诊断。E-mail: ytszgw@163.com

腰2椎体压缩骨折可测量胸12椎体代替，测量时要避开椎体骨皮质和椎体中央静脉沟等结构。所有测量由接受过QCT软件培训的放射科医生进行，QCT系统定期用欧洲脊柱校准体模进行校准。

1.4 AI定量CT辅助诊断系统测量腰椎vBMD 将标准胸部LDCT图像导入AI定量CT辅助诊断系统(慧影医疗科技股份有限公司)，该系统可自动进行胸腰椎椎体分割、标记并测量相关数值，最终输出胸12、腰1、腰2椎体的vBMD及平均vBMD(图1)。椎体的分

割是采用U-Net算法模型进行处理；而BMD的测量则采用了密集连接卷积神经网络中的DenseNet模型。

1.5 统计学处理 采用SPSS 22.0统计软件包进行统计学分析，计量资料以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示，绘制散点图和Bland-Altman图检验AI定量CT辅助诊断系统和QCT结果之间的关系，同时计算二者之间的Pearson相关系数 r 。所有统计检验均采用双侧检验， $P<0.05$ 被认为具有统计学意义。

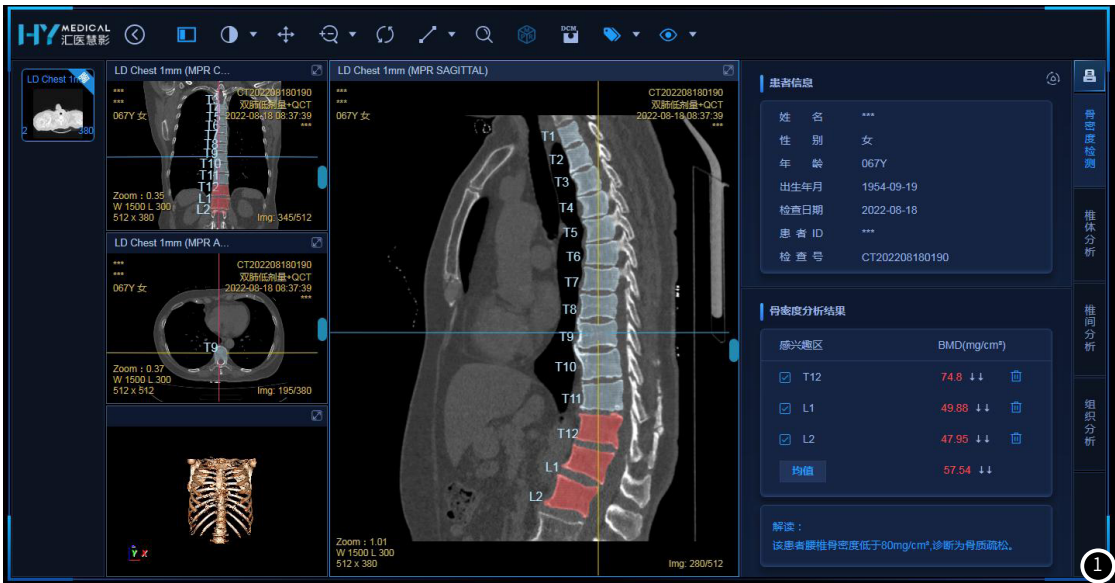


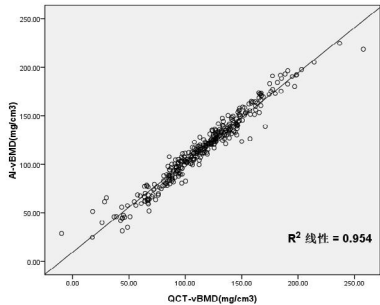
图1 AI定量CT辅助诊断系统界面

2 结果

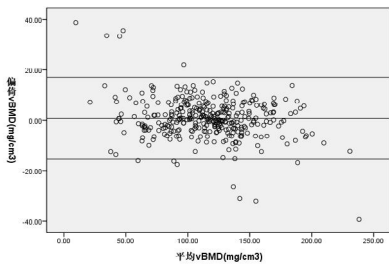
2.1 所有受检者均在两种系统中成功完成腰椎vBMD的测量，AI定量CT辅助诊断系统测量的vBMD平均值为 $116.38 \pm 36.07 \text{ mg/cm}^3$ ，QCT测量的vBMD平均值为 $115.60 \pm 38.07 \text{ mg/cm}^3$ ，Pearson相关分析显示二者呈显著正相关(相关系数 r 为0.977， $P<0.05$)，线性回归相关分析的拟合优度 R^2 为0.954(图2A、表1)。Bland-Altman分析显示二者对腰椎BMD的测量具有良好的一致性，95%一致性限值(-15.36 、 16.91) mg/cm^3 ，平均误差为 0.77 mg/cm^3 (图2B)。

2.2 在198名男性中，年龄 $50 \sim 84(59.47 \pm 8.26)$ 岁，AI定量CT辅

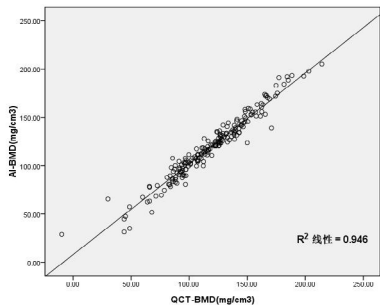
助诊断系统测量的平均vBMD为 $119.55 \pm 32.51 \text{ mg/cm}^3$ ，QCT测量的平均vBMD为 $118.73 \pm 33.66 \text{ mg/cm}^3$ ，Pearson相关分析显示二者呈显著正相关(相关系数 r 为0.973， $P<0.05$)，线性回归相关分析拟合优度 R^2 为0.946(图3A、表1)。139名女性中，年龄 $50 \sim 85(60.01 \pm 7.12)$ 岁，AI定量CT辅助诊断系统测量的平均vBMD为 $111.86 \pm 40.05 \text{ mg/cm}^3$ ，QCT测量的平均vBMD为 $111.15 \pm 43.09 \text{ mg/cm}^3$ ，Pearson相关分析显示二者亦呈显著正相关(相关系数 r 为0.981， $P<0.05$)，线性回归相关分析拟合优度 R^2 为0.962(图3B、表1)。



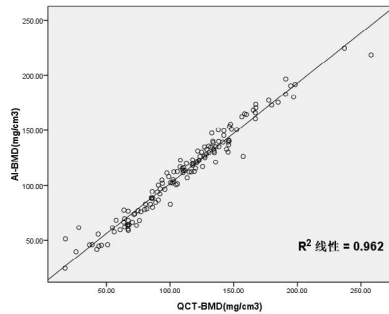
2A



2B



3A



3B

图2A-图2B AI定量CT辅助诊断系统与QCT腰椎vBMD测量方法的线性回归关系(图2A)及Bland-Altman图(图2B)。
图3A-图3B 图2A、2B分别为男性和女性AI定量CT辅助诊断系统与QCT腰椎vBMD测量方法的线性回归关系。

表1 AI定量CT辅助诊断系统与QCT腰椎vBMD测量值相关分析

	AI-QCT(mg/cm ³)	QCT(mg/cm ³)	R ²	r	P值
总平均vBMD	116.38±36.07	115.60±38.07	0.954	0.977	<0.05
男性平均vBMD	119.55±32.51	118.73±33.66	0.946	0.973	<0.05
女性平均vBMD	111.86±40.05	111.15±43.09	0.962	0.981	<0.05

3 讨 论

腰椎骨质疏松可导致骨量减少、脆性增加而发生椎体压缩性骨折，骨质疏松症以中老年人多见，尤其是中老年女性^[9]。随着我国人口老龄化的加速发展和保健意识的提高，骨质疏松的发现率不断增加，引起了广泛的社会关注^[10]。影像骨密度测量常用来作为腰椎骨质疏松评估、风险预测及疗效评价的依据，随着AI在医学影像方面的快速发展，基于深度学习及机器学习的方法已广泛应用于腰椎的研究^[5-7,11]。目前研究表明，基于LDCT的腰椎QCT骨密度测量具有可行性^[12-13]，本研究旨在利用日常临床工作中的胸部LDCT图像，在无需额外费用和辐射的情况下实现全自动机会性腰椎骨密度的测量。线性回归分析和Bland-Altman分析结果显示，AI定量CT辅助诊断系统所测的腰椎平均vBMD与定量QCT所测得平均vBMD具有显著一致性，并且在不同性别中亦具有显著的一致性。因此，可认为AI定量CT辅助诊断系统基于胸部LDCT在腰椎BMD测量方面具备与QCT相当的能力。

本研究的AI定量CT辅助诊断系统可全自动进行胸腰椎椎体分割、标记及vBMD的输出，结果显示全部椎体均被系统准确地分割。该系统采用了U-Net算法作为椎体分割模型，U-Net是一种广泛应用于医学图像分割的卷积神经网络模型，具有良好的泛化能力^[8,14]。在分割结果获得后，还进行了修补处理和进一步优化，若修补效果不理想，可采用形状拟合方法对缺失的椎体进行估计。BMD预测采用的是DenseNet模型，它是一种密集连接卷积神经网络，核心是密集块(dense block, DB)，由于DenseNet架构的出色性能，已被应用于多个医学影像领域^[15-17]，应用前景广阔。

既往研究表明，可以使用QCT软件将覆盖L1和L2脊柱的CT图像用于腰椎骨密度测量，而无需额外的成本和暴露^[13,18-20]。Niu等人基于深度学习的全自动系统能够使用LDCT扫描数据进行自动计算BMD，可以进行机会性骨质疏松症筛查^[21]。Bodden J等人研究证明基于常规临床检查CT图像，自动提取vBMD对于骨质疏松所致腰椎骨折具有预测价值^[22]。AI定量CT辅助诊断系统作为一种新的、可靠的腰椎骨密度测量方法，除了具有常规QCT的优势外，该系统无需外部体模及其校准，也不需要人工测量。因此，它可用于因各种原因行胸部LDCT受检者的机会性腰椎骨质疏松筛查，是DXA或QCT筛查的一种可行性替代方案，并可全自动辅助临床医生筛查无症状骨质疏松患者，对于未接受DXA或QCT检查的受检者，其受益更为明显。

综上所述，AI定量CT辅助诊断系统可自动基于胸部LDCT图像机会性测量腰椎vBMD，与QCT间有很强的一致性，可在不增加辐射剂量及成本的情况下快速、大规模筛查骨质疏松人群，具有重要的临床价值及潜力。然而，本研究存在一些不足之处，如样本量较少和单中心研究的限制，这可能导致结果的偏差。因此，未来的研究需要增加样本量，并进行多中心和多机型的评估，以更全面地评估AI定量CT辅助诊断系统的价值。

参考文献

- [1] Wu J, Qu Y, Wang K, et al. Healthcare resource utilization and direct medical costs for patients with osteoporotic fractures in China[J]. Value Health Reg Issues, 2019, 18: 106-111.
- [2] 郭永传, 马守战, 贾思明. 经皮球囊扩张椎体后凸成形术治疗老年骨质疏松性脊柱骨折的效果观察[J]. 中国实用医刊, 2023, 50(1): 36-39.
- [3] 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, 2018, 18: 59-64.

- [4] Li N, Li XM, Xu L, et al. Comparison of QCT and DXA: osteoporosis detection rates in postmenopausal women[J]. Int J Endocrinol, 2013, 2013: 895474.
- [5] Yang J, Liao M, Wang Y, et al. Opportunistic osteoporosis screening using chest CT with artificial intelligence[J]. Osteoporos Int, 2022, 33(12): 2547-2561.
- [6] Lessmann N, van Ginneken B, de Jong PA, et al. Iterative fully convolutional neural networks for automatic vertebra segmentation and identification[J]. Med Image Anal, 2019, 53: 142-155.
- [7] Löffler MT, Jacob A, Scharr 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.
- [8] Dolz J, Desrosiers C, Ben Ayed I. IVD-Net: intervertebral disc localization and segmentation in MRI with a multi-modal UNet[J]. Springer International Publishing, 2019: 130-143.
- [9] 成东亮, 冯红梅, 文戈, 等. 磁共振脂肪定量技术IDEAL-IQ评价腰椎骨质疏松严重程度的价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(5): 157-159.
- [10] 中华医学会放射学分会骨关节学组, 中国医师协会放射医师分会肌骨学组, 中华医学会骨科学分会骨质疏松学组, 等. 骨质疏松的影像学及骨密度诊断专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(8): 745-752.
- [11] Liu L, Si M, Ma H, et al. A hierarchical opportunistic screening model for osteoporosis using machine learning applied to clinical data and CT images[J]. BMC Bioinformatics, 2022, 23(1): 63.
- [12] Malekzadeh M, Abbasi-Rad S, Keyak JH, et al. Liquid calibration phantoms in ultra-low-dose QCT for the assessment of bone mineral density[J]. J Clin Densitom, 2020, 23: 108-16.
- [13] 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.
- [14] Zhang R, He A, Xia W, et al. Deep learning-based fully automated segmentation of regional muscle volume and spatial intermuscular fat using CT[J]. Acad Radiol, 2023, S1076-6332(23)00305-7.
- [15] Zhang J, Li Z, Yan S, et al. An algorithm for automatic rib fracture recognition combined with nnu-net and denseNet[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2022, 2022: 5841451.
- [16] Dalvi PP, Edla DR, Purushothama BR. Diagnosis of coronavirus disease from chest x-ray images using densenet-169 architecture[J]. SN Comput Sci, 2023, 4(3): 214.
- [17] Liao T, Li L, Ouyang R, et al. Classification of asymmetry in mammography via the DenseNet convolutional neural network[J]. Eur J Radiol Open, 2023, 11: 100502.
- [18] Valentinitich A, Trebeschi S, Kaesmacher J, et al. Opportunistic osteoporosis screening in multi-detector CT images via local classification of textures[J]. Osteoporos Int, 2019, 30: 1275-85.
- [19] Bott KN, Matheson BE, Smith ACJ, et al. Addressing challenges of opportunistic computed tomography bone mineral density analysis[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(15): 2572.
- [20] 蒋新新, 钱伟军, 李立. 中老年人群中不同胸腰椎骨密度的定量CT分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20(5): 179-182.
- [21] Niu X, Huang Y, Li X, et al. Development and validation of a fully automated system using deep learning for opportunistic osteoporosis screening using low-dose computed tomography scans[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(8): 5294-5305.
- [22] Bodden J, Dieckmeyer M, Sollmann N, et al. Incidental vertebral fracture prediction using neuronal network-based automatic spine segmentation and volumetric bone mineral density extraction from routine clinical CT scans[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1207949.

(收稿日期: 2023-09-12)

(校对编辑: 韩敏求)