

不同重建算法与辐射剂量对定量 CT 骨密度测量的影响:体模研究

童小雨,刘义军,方鑫,李贝贝,王旭,陈安良

【摘要】 目的:探讨不同辐射剂量、不同等级的滤波反投影算法(FBP)、迭代重建算法(Karl)和深度学习重建算法(DL)对骨密度测量值准确性的影响。方法:使用联影 uCT760 CT 机,分别采用剂量调制等级 3(常规辐射剂量组,ND)和剂量调制等级 1(低辐射剂量组,LD)对拟人化欧洲脊柱体模(ESP)进行 10 次重复扫描。扫描结束后对每次扫描的图像分别采用 FBP、Karl(5、7、9 级)和 DL(1~4 级)算法进行图像重建,共获得 16 组重建图像。在 QCT Pro 工作站上测量各组图像上 $L_1 \sim L_3$ 椎体的骨密度(BMD)值,并计算其与各椎体体模标定值的相对误差(RE);在 L_1 、 L_2 和 L_3 椎体内放置感兴趣区,测量其 CT 值及 SD 值,并计算对比噪声比(CNR)。采用独立样本 t 检验分析分别比较 16 组图像中 BMD 测量值与真实值的差异,采用配对样本 t 检验分析 ND 组与 LD 组之间 BMD 测量值和辐射剂量的差异,采用单因素方差分析比较相同辐射剂量不同重建算法和等级的 8 组图像之间 BMD 测量值和 CNR 的差异。结果:LD 组的毫安秒(mAs)、CTDIvol 和 DLP 相较于 ND 组分别降低了 78.41%、78.25% 和 78.28%,差异均有统计学意义($t=158.692 \sim 1699.766$, P 均 < 0.001)。不同辐射剂量相同重建算法下, L_1 、 L_2 和 L_3 的 BMD 值的差异均无统计学意义($t=-2.006 \sim 1.472$, P 均 > 0.05);相同辐射剂量下 8 组重建图像上所测得的 $L_1 \sim L_3$ 椎体的 BMD 值的总体差异均无统计学意义($F=0.485 \sim 1.954$, P 均 > 0.05);各组图像所测得的 BMD 值与 ESP 体模标定值之间的差异均有统计学意义(P 均 < 0.05),RE 范围为 2.17%~7.44%;相同辐射剂量组内 8 组重建图像上测得的各椎体 CNR 的差异均有统计学意义($F=47.883 \sim 153.983$, P 均 < 0.001)。结论:不同重建算法及相同算法不同等级在不同辐射剂量下对骨密度测量的准确性均无显著影响;选择合适的重建算法及等级可在保证图像质量的前提下有效降低患者的辐射剂量。

【关键词】 图像重建;深度学习;迭代重建;骨密度;辐射剂量;体层摄影术,X 线计算机

【中图分类号】 R814.42;R681.5 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)08-1055-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.08.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Investigating the effect of different reconstruction algorithms and radiation doses on quantitative CT bone mineral density measurement: a phantom study TONG Xiao-yu, LIU Yi-jun, FANG Xin, et al. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Liaoning 116011, China

【Abstract】 **Objective:** To investigate the effect of different levels of filtered back-projection algorithm (FBP), iterative reconstruction algorithm (Karl) and deep learning reconstruction algorithm (DL) on the accuracy of bone mineral density assessment at different radiation doses. **Methods:** Using the United Image uCT760 CT scanner, a phantom was scanned at different radiation doses by changing the level of dose modulation technique. The anthropomorphic European Spine Phantom (ESP) was scanned 10 times with dose modulation level 3 (conventional radiation dose group, ND) and dose modulation level 1 (low radiation dose group, LD), respectively. After scanning, the images of each set were reconstructed using FBP, Karl (level 5, 7, 9) and DL (level 1~4) algorithms, respectively, and a total of 16 groups of reconstructed images were obtained. The QCT Pro workstation was used to measure the bone mineral density (BMD) of $L_1 \sim L_3$ vertebral bodies in each set of images and the relative errors (RE) were calculated. Regions of interest were placed in the L_1 , L_2 and L_3 vertebrae, and the CT and its SD values were measured to calculate the contrast-to-noise ratio (CNR). The two-sample t -test was used to compare the BMD measurements on 16 groups of images with the true BMD values. The

作者单位:116011 辽宁大连,大连医科大学附属第一医院放射科

作者简介:童小雨(1998-),女,四川德阳人,硕士研究生,主要从事 CT 成像工作。

通讯作者:刘义军, E-mail: yijunliu1965@126.com

paired *t*-test was used to analyze the differences in BMD measurements and radiation doses between ND group and LD group. One-way ANOVA was used to compare the differences in BMD measurements and CNR among the 8 groups of images with different reconstruction algorithms and levels at the same radiation dose. **Results:** The mean of mAs, CTDIvol and DLP in the LD group were reduced by approximately 78.41%, 78.25% and 78.28% compared with the ND group, all with statistically significant differences ($t=158.692\sim 1699.766$, all $P<0.001$). There were no statistically significant differences in BMD measurement of L_1 , L_2 and L_3 by ESP at different radiation doses and with the same reconstruction algorithm and level ($t=-2.006\sim 1.472$, all $P>0.05$). At the same radiation dose, there was no significant difference in BMD values of $L_1\sim L_3$ vertebral bodies among the eight groups of reconstructed images ($F=0.485\sim 1.954$, all $P>0.05$). The differences in BMD measured in each of the 16 groups compared to the ESP true values were statistically significant (all $P<0.05$), with an RE range of 2.17% to 7.44%. The differences in CNR values for each vertebra among the 8 groups with the same radiation dose were statistically significant ($F=47.883\sim 153.983$, all $P<0.001$). **Conclusion:** Different reconstruction algorithms and different levels of the same algorithm at different radiation dose levels do not affect the accuracy of BMD measurements. The appropriate selection of reconstruction algorithm and grade can reduce patients' radiation dose while ensuring image quality.

【Key word】 Image reconstruction; Deep learning; Iterative reconstruction; Bone mineral density; Radiation dose; Tomography, X-ray computed

近年来对骨质疏松的流行病学调查显示 50 岁以上人群中骨质疏松症的患病率高达 19.2%^[1], 骨密度是骨质疏松和骨折患者的终身重要监测指标, 骨量减少和骨质疏松的检出尤为重要, 骨密度的机会性筛查是预防骨质疏松的关键^[2-4]。双能 X 射线吸收测量法 (dual energy X-ray absorptiometry, DXA) 和定量 CT (quantitative computed tomography, QCT) 均能无创性检测骨密度^[5-7]。QCT 技术对骨松质的变化更为敏感, 同时可三维观察椎体形态学改变, 临床应用价值高, 但患者接受的辐射剂量较大。如何降低辐射剂量并保证骨密度测量的准确性是当前 QCT 研究的热点之一。选用合适的重建算法是间接降低患者辐射剂量的方式之一, 继传统的滤波反投影算法 (filtered back projection, FBP) 之后, 又相继开发了迭代重建算法 (iterative reconstruction, IR) 和深度学习 (deep learning, DL) 重建算法, 较大程度地提高了降低辐射剂量的潜能^[8]。但目前对于在不同辐射剂量下不同重建算法对骨密度测量的准确性有无影响的相关研究较少。本研究基于拟人化仿真欧洲脊柱体模, 探究不同辐射剂量下不同重建算法及其不同等级对骨密度测量准确性的影响。

材料与方法

1. 研究对象

采用拟人化仿真欧洲脊柱体模 (European Spine Phantom, ESP; 编号 145, 德国 QRM 公司) 进行测量和分析。ESP 由一定的环氧树脂、羟基磷灰石

(Hydroxyapatite, HAP) 等成分组成, 主要用于骨密度测量仪器的标准化和相互校准, 其 X 射线的衰减等于水与 HAP 的混合物。ESP 包含 3 个不同骨密度值的椎体, 从上至下标记为第一 (L_1)、第二 (L_2) 和第三腰椎 (L_3), 对应的真实骨密度值 (标定值) 分别为 50、100 和 200 mg/cm^3 。

2. 扫描方法

使用联影 uCT760 CT 机进行扫描。首先对 QCT 校准体模进行扫描, 并按照规定对工作站进行校准, 再采用 2 种辐射剂量对 ESP 体模进行扫描, 每种剂量的扫描均重复 10 次。管电流采用剂量调制技术, 常规辐射剂量组 (normal dose, ND) 选用剂量调制等级 3, 低辐射剂量组 (low dose, LD) 选用剂量调制等级 1; 两组的其它扫描参数均相同: 120 kV, 螺距 0.9875, 转速 0.5 s/r, 扫描层厚 5 mm, 矩阵 512×512 , 视野 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$, 床高以 ESP 体模中心为准。

重建参数: 两组均分别采用 FBP、等级 5、7、9 的迭代重建算法 Karl (keep artifact really low, Karl) 以及等级 1~4 的 DL 算法进行图像重建, 共获得 16 组图像, 重建层厚及层间距均为 1 mm, 软组织 (B-SOFT-B) 算法。

3. 测量和分析

骨密度测量: 将扫描数据上传至骨密度测量工作站 (Model 4 QCT pro v6.1, Mindways) 进行分析处理, 由一位骨肌组诊断医师在各组图像上分别测量各椎体松质骨的骨密度 (bone mineral density, BMD)。在横轴面图像上选取各椎体骨松质区域勾画 ROI, 大

小约为椎体骨松质面积的 $2/3$,然后在冠状面/矢状面图像上设定高度为 9 mm,尽量选取椎体的中间层面,软件即可自动生成容积 ROI(VOI)并计算出其 BMD 值,每一椎体骨密度值均测量 3 次,计算均值作为该椎体的骨密度值(图 1)。采用相对误差(relative error, RE)评价测量的准确性:

$$RE = \frac{|\text{测量值} - \text{标定值}|}{\text{标定值}} \times 100\% \quad (1)$$

椎体图像质量评估:由同一位诊断医师使用 uCT760 后处理工作站,在各椎体中心层面放置 ROI,大小约为整个椎体面积的 $2/3$ ^[9],测量 CT 值及其 SD 值;以腹前方区域作为背景组织,测量其 CT 值及其 SD 值;按照公式(2)计算椎体的对比噪声比(contrast noise ratio, CNR):

$$CNR = \frac{CT_{\text{椎体}} - CT_{\text{背景}}}{SD_{\text{背景}}} \quad (2)$$

4. 辐射剂量

扫描结束后记录 ND 组及 LD 组的平均毫安秒(milliamperere seconds, mAs)、容积 CT 剂量指数(CT dose index volume, CTDI_{vol})、剂量长度乘积(dose length product, DLP)。

5. 统计学分析

应用 SPSS24.0 和 MedCalc20.022 统计软件包对数据进行处理,计量资料以均数±标准差表示,采用独立样本 *t* 检验分析各组 BMD 测量值与真实值的差异,采用配对样本 *t* 检验分析不同辐射剂量之间管电流(mAs)、CTDI_{vol}、DLP 和 BMD 的差异,采用单因素方差分析比较相同辐射剂量不同重建算法椎体 BMD 和 CNR 的差异,进一步组间两两比较采用 LSD 法,采用配对样本 *t* 检验比较低辐射剂量组结合不同等级算法与 ND-FBP 组各椎体 CNR 值之间的差异。

结果

1. 辐射剂量

LD 组的管电流、CTDI_{vol} 和 DLP 分别为 $(38.60 \pm 0.843)\text{mAs}$ 、 $(3.171 \pm 0.02)\text{mGy}$ 和 $(65.55 \pm 0.05)\text{mGy} \cdot \text{cm}$,相较于 ND 组分别降低了 78.41%、78.25% 和 78.28%,各指标在两组间的差异均有统计学意义($t = 158.692 \sim 1699.766$, P 均 < 0.001)。

2. 组间及组内 BMD 的差异性分析

各椎体($L_1 \sim L_3$)在相同重建算法不同辐射剂量下所测得 BMD 值的差异均无统计学意义($t = -2.006 \sim 1.472$, $P > 0.05$)。ND 组及 LD 组中,各算法之间所测得的 $L_1 \sim L_3$ 的 BMD 值的差异均无统计学意义($F = 0.485 \sim 1.954$, $P > 0.05$),详见表 1。

16 组图像上中所测得 BMD 值与 ESP 标定值之间的差异均有统计学意义($t = -114.091 \sim -17.114$, $P < 0.05$)。各椎体 BMD 测量值的 RE 范围为 2.17%~7.44%;对 16 个组总体情况进行分析, L_2 的 RE 最大,平均值为 $7.16\% \pm 0.58\%$, L_3 的 RE 最小,平均值为 $2.23\% \pm 0.20\%$,各组 RE 详见表 2。

3. 不同辐射剂量下各椎体 CNR 值的比较

不同算法之间各椎体 CNR 的差异均有统计学意义($F = 47.883 \sim 153.983$, $P < 0.05$),Karl 算法和 DL 算法随着各自算法等级的提高,图像噪声逐渐降低, CNR 逐渐升高(图 2)。

讨论

算法的发展使低剂量扫描成为可能,目前临床常用的算法可分为 3 种:滤波反投影算法、迭代算法和深度学习重建算法。不同图像重建算法对图像质量及辐

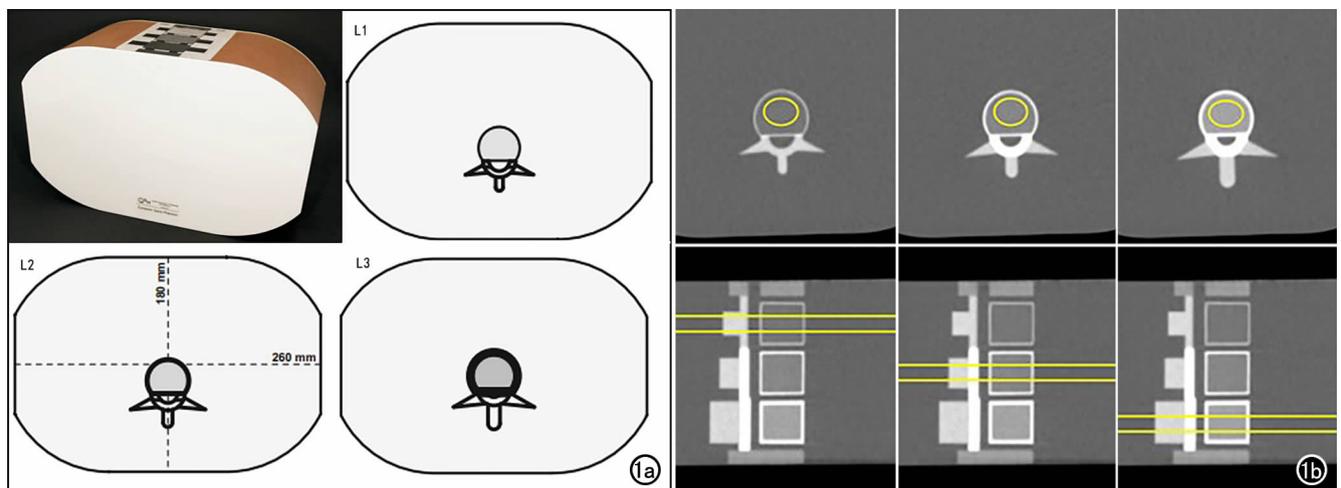


图 1 ESP 测量示意图。a)ESP 外观及 $L_1 \sim L_3$ 椎体 CT 简图;b)QCT 骨密度测量 ROI 示意图,在体模的 $L_1 \sim L_3$ 椎体中心层面的横轴面图像上,在松质骨内勾画 ROI,在矢状面定位像上确定测量的范围,软件即可自动生成每个椎体的三维容积感兴趣区,并获得其骨密度值。

表1 不同辐射剂量和重建算法测得的3个椎体的BMD值及比较 /mg/cm³

部位	FBP	Karl5	Karl7	Karl9	DL1	DL2	DL3	DL4	F 值	P 值
ND										
L ₁	52.53±0.43	52.51±0.45	52.56±0.47	52.46±0.35	52.28±0.41	52.42±0.28	52.45±0.33	52.48±0.32	0.485	0.843
L ₂	107.28±0.40	107.16±0.44	107.19±0.30	107.20±0.36	106.97±0.32	107.13±0.35	106.80±0.39	106.91±0.44	1.954	0.073
L ₃	204.47±0.12	204.48±0.16	204.49±0.16	204.50±0.14	204.38±0.32	204.31±0.31	204.41±0.27	204.29±0.39	1.065	0.395
LD										
L ₁	52.25±0.31	52.31±0.43	52.35±0.35	52.43±0.31	52.16±0.40	52.22±0.28	52.16±0.32	52.46±0.31	1.167	0.333
L ₂	107.39±0.71	107.41±0.62	107.37±0.67	107.44±0.63	107.28±0.79	107.00±0.51	107.22±0.84	107.01±0.92	0.588	0.763
L ₃	204.69±0.64	204.73±0.68	204.74±0.51	204.76±0.34	204.34±0.42	204.37±0.43	204.40±0.29	204.33±0.35	1.755	0.110

表2 不同辐射剂量和重建算法测得的3个椎体BMD值的RE及比较 /%

部位	FBP	Karl5	Karl7	Karl9	DL1	DL2	DL3	DL4	F 值	P 值
ND 组										
L ₁	5.07±0.86	5.02±0.90	5.11±0.93	4.93±0.70	4.57±0.81	4.84±0.57	4.90±0.66	4.95±0.64	0.485	0.843
L ₂	7.28±0.40	7.16±0.44	7.19±0.30	7.20±0.36	6.97±0.32	7.13±0.35	6.80±0.39	6.91±0.44	1.954	0.073
L ₃	2.23±0.06	2.24±0.08	2.24±0.08	2.25±0.07	2.19±0.16	2.15±0.16	2.21±0.13	2.14±0.19	1.065	0.395
LD 组										
L ₁	4.49±0.62	4.61±0.85	4.70±0.70	4.87±0.63	4.32±0.80	4.44±0.55	4.31±0.64	4.92±0.62	1.167	0.333
L ₂	7.39±0.71	7.41±0.62	7.37±0.67	7.44±0.63	7.28±0.79	7.00±0.51	7.22±0.84	7.01±0.92	0.588	0.763
L ₃	2.34±0.32	2.37±0.34	2.37±0.25	2.38±0.17	2.17±0.21	2.18±0.22	2.20±0.14	2.17±0.18	1.755	0.110

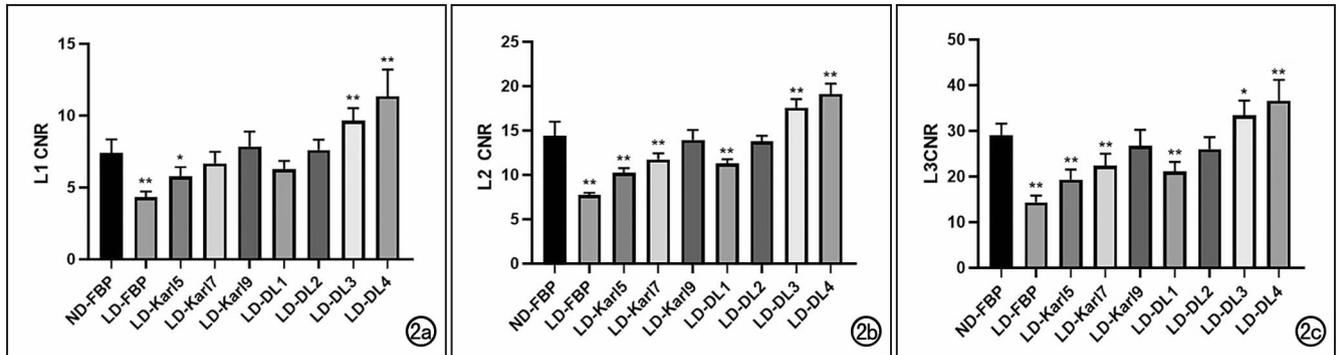


图2 各椎体不同算法之间 CNR 值比较的柱状图。a) L₁ 椎体; b) L₂ 椎体; c) L₃ 椎体。* 与 ND-FBP 比较, $P < 0.05$; ** 与 ND-FBP 比较, $P < 0.001$ 。

射剂量的影响不同:FBP 算法为传统 CT 图像算法,图像受辐射剂量影响较大;Karl 算法是一种基于投影域的迭代降噪技术,能在降低图像整体噪声水平的同时,保持图像的组织结构特征^[10];DL 算法是基于人工智能在图像重建方面的突破,采用了先进的深度卷积神经网络(deep neural network,DNN)技术,在降低噪声的同时能使得图像保持较高的空间分辨率,在一定程度上为辐射剂量的降低提供了技术保证^[11-12]。不同算法对于图像信号的处理方式也有明显不同,算法改变对于骨密度测量准确性的影响尚不清楚,因此本研究基于带有标定值的欧洲脊柱仿真体模,同时为了更好地模拟临床扫描环境,采用剂量调制技术进行常规剂量(调制等级 3,为常规腹部扫描等级)和低剂量(调制等级 1)扫描,该技术能够根据扫描定位像中的衰减信息,确定扫描部位所需的剂量曲线,同时能基于人体组织结构的差异而智能调节管电流的大小,从而可提供更均匀的剂量分布。

本研究中 LD 组相较于 ND 组,管电流(mAs)、CTDI_{vol} 和 DLP 分别降低了 78.41%、78.25 和

78.28%,辐射剂量降低程度与蒋耀军等^[9]和吴巧玲等^[13]学者的研究结果基本一致,且所获得的图像均可用于骨密度测量,表明采用深度学习重建算法可满足临床诊断需求,在降低辐射剂量方面有巨大潜力。本研究结果显示不同辐射剂量下相同算法重建图像上所测得的 BMD 值的差异无统计学意义($P > 0.05$),这与高冰等^[14]采用低管电流方式行腰椎低剂量 QCT 的研究结果一致,王勇朋等^[15]采用管电流 80 mA 的低剂量扫描条件行胸部 CT 扫描及 QCT 骨密度测量的一站式研究结果也印证了这一点。上述结果均表明管电流不会影响 BMD 值的测量,可作为 QCT 低剂量扫描的有效方法。同时本研究中发现不同重建算法(FBP、Karl 和 DL)以及不同重建等级(Karl 和 DL 算法)之间所测得的 BMD 值的差异均无统计学意义($P > 0.05$)。笔者认为导致这一结果出现的原因是 QCT 是利用常规 CT 的扫描数据,通过将带有椎体 X 线衰减信息的图像经过 QCT 质控分析系统进行校正,与专业的 QCT 羟基磷灰石体模进行等效密度的转化,从而获得椎体骨质含量的信息,是目前最精准的骨密度

测量方法^[16]。本研究中采用剂量调制技术来降低辐射剂量,使用不同算法来提升图像质量,总体上均未影响到椎体对 X 射线的衰减信息,所以不同辐射剂量及不同等级和类型的重建算法在骨密度值的测量上均表现出较好的一致性,组间差异均无统计学意义。

本研究结果显示,不同辐射剂量、重建算法和等级得到的 16 组图像上所测得的 BMD 值相较于 ESP 体模的标定值,差异均有统计学意义。笔者认为,扫描设备不同、部分容积效应、CT 值漂移、线性回归的阈值水平不同等因素均会使 CT 测量值出现一定的差异,使得 BMD 测量值出现一定的误差^[17],可接受的准确度误差范围为 5%~15%。本研究中采用 RE 来进行各组图像 BMD 测量值的准确性评价,最终测量值的 RE 范围为 2.17%~7.44%,在允许的偏差范围之内。其中,针对 16 个组总体情况进行分析, L_2 的 RE 最大,平均值约为 7.16%±0.58%, L_3 的 RE 最小,平均值约为 2.23%±0.20%。

本研究中在显著降低辐射剂量后,LD-Karl9 图像上测得椎体的 CNR 值虽与 ND-FBP 之间的差异无统计学意义,但既往有研究结果表明,高等级 Karl 算法的重建图像上解剖结构显示过于平滑,有很强的塑料感。DL 算法有四个等级可供选择,本研究结果显示 LD-DL2 图像上测得椎体的 CNR 值与 ND-FBP 之间的差异无统计学意义;相较于 Karl 算法,DL 算法拥有更好的降噪性能,且相较于 ND-FBP,LD-DL3 和 LD-DL4 图像椎体的 CNR 值均有显著提高,LD-DL3 组中 L_1 、 L_2 、 L_3 的 CNR 较 ND-FBP 分别提高了 30.58%、17.81%和 14.73%,LD-DL4 组中 L_1 、 L_2 、 L_3 的 CNR 分别较 ND-FBP 提高了 53.72%、32.48%和 26.06%。上述结果显示深度学习算法在椎体的显示上有很好的应用前景,应根据扫描条件选择适当的重建算法。

本研究存在的局限性:ESP 虽然模拟的是人体真实的骨密度值,但其组成成分依旧与人体之间存在一定的差异;ESP 中模拟的椎体结构周围均为水,不含人体其它脏器组织,所以本研究中仅针对椎体的 CNR 进行分析,未进行图像的主观评分。

综上所述,不同重建算法、相同算法不同等级在不同辐射剂量水平下对骨密度的测量准确性均无显著影响;选择恰当的 DL 重建算法等级可在保证图像质量的同时有效降低患者的辐射剂量,有利于临床随访观察。

参考文献:

[1] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会. 中国骨质疏松症流行病学调查及“健康骨骼”专项行动结果发布[J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2019, 12(4): 317-318.

- [2] 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.
- [3] Roski F, Hammel J, Mei K, et al. Opportunistic osteoporosis screening: contrast-enhanced dual-layer spectral CT provides accurate measurements of vertebral bone mineral density[J]. Eur Radiol, 2021, 31(5): 3147-3155.
- [4] Gruenewald LD, Koch V, Martin SS, et al. Diagnostic accuracy of quantitative dual-energy CT-based volumetric bone mineral density assessment for the prediction of osteoporosis-associated fractures[J]. Eur Radiol, 2022, 32(5): 3076-3084.
- [5] Roski F, Hammel J, Mei K, et al. Bone mineral density measurements derived from dual-layer spectral CT enable opportunistic screening for osteoporosis[J]. Eur Radiol, 2019, 29(11): 6355-6363.
- [6] Li X, Li X, Li J, et al. The accuracy of bone mineral density measurement using dual-energy spectral CT and quantitative CT: a comparative phantom study[J/OL]. Clin Radiol, 2020, 75(4): 320. e9-320. e15.
- [7] 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.
- [8] Jensen CT, Liu X, Tamm EP, et al. Image quality assessment of abdominal CT by use of new deep learning image reconstruction: initial experience[J]. AJR, 2020, 215(1): 50-57.
- [9] 蒋耀军, 吴艳, 张永高, 等. 低管电流联合多模型迭代重建技术对腰椎定量 CT 准确度的应用价值[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2018, 38(1): 59-63.
- [10] 朱彦瑾, 赵凡惠, 雷禹, 等. Karl 迭代重建技术对低剂量 CT 定量评估婴幼儿肺密度及肺容积的影响[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(4): 599-603.
- [11] Nam JG, Hong JH, Kim DS, et al. Deep learning reconstruction for contrast-enhanced CT of the upper abdomen: similar image quality with lower radiation dose in direct comparison with iterative reconstruction[J]. Eur Radiol, 2021, 31(8): 5533-5543.
- [12] Sun J, Li H, Wang B, et al. Application of a deep learning image reconstruction (DLIR) algorithm in head CT imaging for children to improve image quality and lesion detection[J/OL]. BMC Med Imaging, 2021, 21(1): e108. DOI: 10.1186/s12880-021-00637-w.
- [13] 吴巧玲, 王沅, 王希恒, 等. 深度学习算法在胰腺低剂量 CT 扫描中改善图像质量的应用价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(4): 437-442.
- [14] 高冰, 张源, 黄世豪, 等. 低剂量定量 CT 测量不同体质量指数人群腰椎骨密度的准确性[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(9): 1401-1404.
- [15] 王勇朋, 阳琰, 何生生, 等. 低剂量胸部 CT 与 QCT 椎体骨密度测量一站式扫描可行性研究[J]. 放射学实践, 2018, 33(11): 1194-1197.
- [16] 刘艳莹, 胡昊, 李万忠, 等. 基于不同管电压下腰椎定量 CT 骨密度测量临床研究[J]. 放射学实践, 2022, 37(10): 1217-1220.
- [17] 端木羊羊, 王玲, 张勇, 等. 骨密度测量的准确度和精密度评价[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(4): 359-364.