

· 论 著 ·

定量 CT 对股骨头松质骨密度的测量

李现龙 许乐洋 范永前*

复旦大学附属华东医院骨科, 上海 200040

中图分类号: R683.42 文献标识码: A 文章编号: 1006-7108(2019) 07-0936-06

摘要: 目的 探讨利用定量 CT(quantitative computed tomography, QCT) 中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块测量股骨头松质骨的骨密度的可重复性, 以及患者双侧股骨头松质骨密度的差异性。方法 回顾性研究 330 名(女性 239 人, 男性 91 人)受试者的股骨头松质骨密度, 对其中因各种原因仅可获得一侧髋关节图像的受试者 149 人进行可重复性研究; 对其余的受试者 181 人进行双侧股骨头松质骨密度的差异性研究。利用 QCT Pro 软件中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块将股骨头划分为上、中、下 3 个层面: 靠近股骨颈上部皮质、经股骨颈中心、靠近股骨颈下部皮质, 并对各个层面进行测量。结果 2 名不同操作者测量同一股骨头的相同层面松质骨密度值的差异无统计学意义($P_{\text{上}} = 0.148 > 0.05$, $P_{\text{中}} = 0.05$, $P_{\text{下}} = 0.097 > 0.05$)。同一患者双侧股骨头相对应层面的松质骨密度之间具有良好相关性。在上层, 两侧股骨头的松质骨密度之间的差异无统计学意义($P_{\text{上}} = 0.445 > 0.05$); 而在中层与下层, 两侧股骨头的松质骨密度之间的差异有统计学意义($P_{\text{中}} = 0.000 < 0.05$, $P_{\text{下}} = 0.000 < 0.05$)。结论 利用 QCT 中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块进行股骨头松质骨的骨密度测量具有较好的可重复性。患者双侧股骨头不同层面松质骨的骨密度具有良好的相关性, 并且左侧股骨头的中层与下层的松质骨密度显著大于右侧。

关键词: 骨密度; 定量 CT; 股骨头; 松质骨

Measurement of cancellous bone mineral density of femoral head by quantitative CT

LI Xianlong, XU Yueyang, FAN Yongqian*

Department of Orthopaedics, Huadong Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China

* Corresponding author; FAN Yongqian, Email: from24@sina.com

Abstract: **Objective** To evaluate the reproducibility of measuring cancellous bone mineral density of femoral head and the differences in cancellous bone mineral density of bilateral femoral heads in patients using “3D Spine Exam Analysis” module in quantitative computed tomography (QCT). **Methods** 330 subjects (239 females and 91 males) were selected for this retrospective study. The reproducibility test was performed in 149 subjects who only had QCT of one hip. The bilateral differential evaluation was performed in the other 181 subjects. The QCT data of hip were transferred to the QCT analysis work station. Using the “3D Spine Exam Analysis” module of QCT Pro software, the femoral head was divided into the upper, middle and lower layers: 3 planes parallel to the long axis of the femoral neck, which were located close to the upper part of the femoral neck, the center of the femoral neck, and the lower part of the femoral neck. And the volumetric bone mineral density of the 3 layers was measured by two experienced operators. **Results** There was no statistical difference in the cancellous bone mineral density at the different layers of the same femoral head measured by two different operators ($P_{\text{upper}} = 0.148 > 0.05$, $P_{\text{middle}} = 0.05$, $P_{\text{lower}} = 0.097 > 0.05$). There was a good correlation between the cancellous bone density at the same layer of bilateral femoral heads in the same patient. In the upper layer, there was no statistical difference between cancellous bone density of the femoral heads on both sides ($P_{\text{upper}} = 0.445 > 0.05$). In the middle and lower layers, there was a statistically significant difference between cancellous bone density at both femoral heads ($P_{\text{middle}} = 0.000 < 0.05$, $P_{\text{lower}} = 0.000 < 0.05$). **Conclusion** Cancellous bone density of femoral head measured by “3D Spine Exam Analysis” module in QCT showed good reproducibility. The cancellous bone mineral density of the same layer of bilateral femoral heads was correlated, and the cancellous bone mineral density of the middle and lower layers of the left femoral head was significantly higher than that of the right.

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(15411951500); 上海市卫生计生系统重要薄弱学科-老年医学项目(2015ZB00)

* 通信作者: 范永前, Email: from24@sina.com

Key words: bone mineral density; quantitative CT; femoral head; cancellous bone

髋部骨折通常是指股骨颈骨折及股骨粗隆间骨折,随着人口老龄化问题的加剧以及工伤事故和交通意外的增多,近年来髋部骨折的发生率在不断增加。双能 X 线吸收测量法(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA)测量髋部面积骨密度(areal bone mineral density, aBMD)已被大家熟悉和应用。在大多数国家,通过 DXA 测量髋部区域的 aBMD 来协助诊断骨质疏松症,间接确定患者发生髋部脆性骨折的风险以及评估治疗骨质疏松的疗效已成为共识。但目前 DXA 在临床上的应用尚存在一定的局限性,使得 DXA 对骨质疏松性骨折患者以及受试者的股骨头 BMD 的测量结果并不理想。定量 CT(quantitative computed tomography, QCT)是将 CT 机配合 QCT 专用体模,利用 QCT 专业分析软件对腰椎和髋关节骨密度进行测量的方法。QCT 可以在 CT 重建后的任意感兴趣区域(region of interest, ROI)内进行三维测量,从而使股骨头体积骨密度(volumetric bone mineral density, vBMD)的测量成为可能。本研究将 QCT 测量脊柱 vBMD 的方法原理应用于测量股骨头内不同层面的松质骨 vBMD,探讨该方法的可重复性以及进一步比较双侧股骨头松质骨相对应层面的 vBMD 是否存在差异性,以期 QCT 测量股骨头不同层面松质骨 vBMD 的临床应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 一般资料

该研究是回顾性研究。在本研究开始时,所有受试者的图像均提前获得。在 2016 年 3 月至 2018 年 3 月期间于我院进行髋部 QCT 检查的受试者中,排除有影响骨代谢的慢性疾病(如肾脏、甲状旁腺、肾上腺疾病及恶性肿瘤等)病史者及使用可影响骨代谢的药物(如糖皮质激素类、双膦酸盐类等)者。最终纳入受试者共 330 人,其中女性 239 人,男性 91 人,年龄 53~99(77.5 ± 10.4)岁。将其中股骨颈骨折以及因各种原因仅可获得一侧髋关节图像的患者归为 A 组,共 149 人,其中女性 108 人,男性 41 人,年龄 53~97(80.6 ± 9.9)岁;将剩余的可获得双侧髋关节清晰图像的患者归为 B 组,共 181 人,其中女性 131 人,男性 50 人,年龄 53~99(74.9 ± 10.2)岁。复旦大学附属华东医院伦理委员会已通过对本研究的审批,所有进行 QCT 检查的受试者均已知晓

该研究内容并签署知情同意书。

1.2 仪器与方法

采用 SIEMENS SOMATOM Definition Flash 64 排 CT 机及 Mindways 公司(Mindways Software Inc. Austin, TX, USA)的 5 样本固体体模。扫描参数为管电压 120 kV,管电流 150 mAs,床高 155.5 mm, SFOV 500 mm,层厚 1 mm,标准算法重建。扫描范围为从髂嵴至股骨上段。扫描时受试者取仰卧位并双手上举抱头,将 QCT 标准体模放置于受试者髋关节下方,体模尽量贴紧受试者,体模中线与受试者体位中线重叠。

1.3 测量软件与方法

将 CT 原始图像从 CT 主机传输至 QCT 工作站进行文件的自动合成与测量,采用 QCT Pro Version 4.2.3 软件中的“Slice Range Pick”模块对 CT 定位片图像进行截取,图像的范围至少要包含股骨头至小粗隆之间的区域。采用 QCT Pro 软件中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块,测量原理同椎体骨密度测量原理。在 CT 横断面图像上浏览包含股骨头的层面,将含有绿色十字的定位框放置在待测一侧的股骨头中心位置。软件自动生成股骨近端横断面、矢状面和冠状面的重建图像,手动调整图像位置,使股骨颈长轴在横断面和冠状面上均与水平线平行,矢状面上黄色十字位于股骨头中心(图 1A~C)。在“Rotation”设置步骤中,为了尽量减少位置选取所带来的差异,笔者设定上、中、下 3 层“Rotation”,它们均与股骨颈长轴平行,并且上、中、下 3 层分别靠近股骨颈上部皮质、经股骨颈中心、靠近股骨颈下部皮质(图 1D)。进入设置 ROI 步骤,手动调整 ROI 的厚度为 5 mm,在避免包含皮质骨的前提下,使得在冠状面上的上、中、下 3 层 ROI 分别靠近股骨颈上部皮质、经股骨颈中心、靠近股骨颈下部皮质,在横断面和矢状面上尽可能多的包含股骨头的松质骨(图 2)。记录测量的上、中、下 3 个层面 ROI 的 vBMD(mg/cm^3)。

QCT 测量股骨头 3 个层面的松质骨 vBMD 的可重复性研究:由 2 名操作者在各自独立的条件下对 A 组患者单侧股骨头在不同时间进行 2 次测量,分别计算并记录平均值。

QCT 测量同一患者的双侧股骨头相对应层面的松质骨 vBMD 的差异性研究。由 2 名操作者在各自独立的条件下对 B 组患者双侧股骨头进行测量,

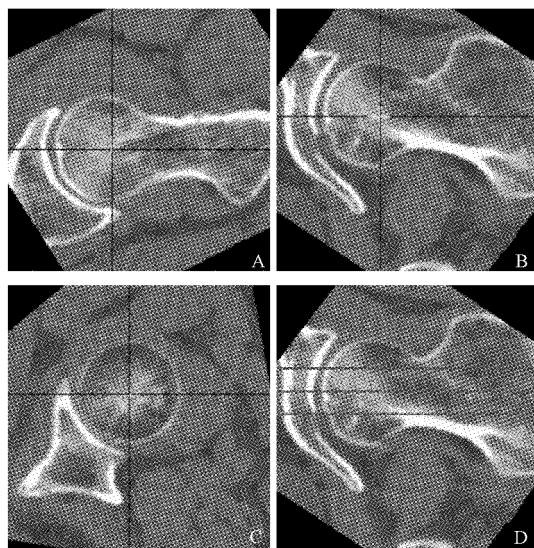


图 1 QCT Pro 软件“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块中手动调整图像。A:横断面上股骨颈长轴与水平线平行;B:冠状面上股骨颈长轴与水平线平行;C:矢状面上十字位于股骨头中心;D:与股骨颈长轴平行的 3 个平面上确定上、中、下三层 Rotation,使其分别靠近股骨颈上部皮质、经股骨颈中心、靠近股骨颈下部皮质。

Fig.1 Manually adjusting the image in the QCT Pro software “3D Spine Exam Analysis” analytics module. A: The horizontal line is parallel to the long axis of the femoral neck on the axial plane; B: The horizontal line is parallel to the long axis of the femoral neck on the coronal plane; C: The yellow cross is located in the center of the femoral head on the sagittal plane; D: The upper, middle and lower layers of rotation are determined on 3 planes parallel to the long axis of the femoral neck, which are located close to the upper part of the femoral neck, the center of the femoral neck, and the lower part of the femoral neck.

计算并记录平均值。

1.4 统计学处理

采用 SPSS 24.0 统计软件。文章中出现的数据均使用 *Shapiro-Wilk test* 检验其正态性,若服从正态分布则用 $\bar{x} \pm s$ 表示,数据若不服从正态分布,则用 M (QR) 即中位数与上下四分位数表示。在 QCT 测量的可重复性研究以及同一患者的双侧股骨头的差异性研究的统计方法选择上,先用 *Shapiro-Wilk test* 检验配对样本以及它们差值的正态性,若差值满足正态性,则采用配对样本 *t* 检验,否则采用 Wilcoxon 符号秩检验, $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

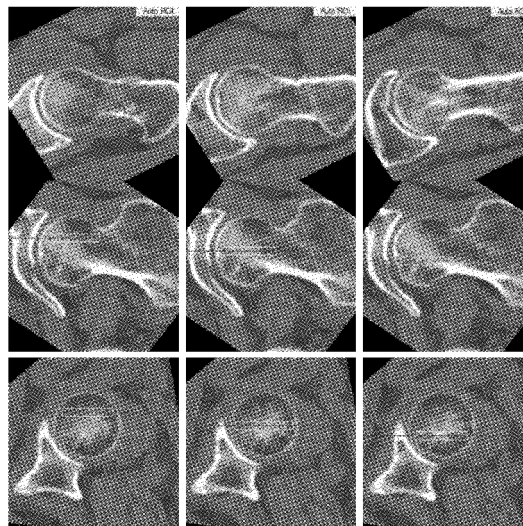


图 2 QCT Pro 软件“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块中手动调整 ROI,使得 ROI 在冠状面上的上、中、下 3 个层面分别靠近股骨颈上部皮质、经股骨颈中心、靠近股骨颈下部皮质,在横断面和矢状面上尽可能多的包含股骨头的松质骨

Fig.2 Manually adjusting the ROI position in the QCT Pro software “3D Spine Exam Analysis” analytics module. The ROIs are located at the upper, middle and lower layers of the coronal plane, respectively, near the upper part of the femoral neck, the center of the femoral neck, and the lower part of the femoral neck. Including as much of the cancellous bone of the femoral head as possible on the axial plane and sagittal plane.

2 结果

2.1 QCT 测量股骨头 3 个层面的松质骨 vBMD 的可重复性研究

两名操作者分别独立的测量 A 组患者的单侧股骨头上、中、下 3 个层面的股骨头松质骨 vBMD 值 2 次,计算并记录 2 次测量的平均值,结果见表 1。
(1) 上层: 两名操作者测量值分别为 139.73 (117.69, 164.84) mg/cm^3 、138.69 (114.70, 165.12) mg/cm^3 ; 两名操作者对股骨头上层的测量结果差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。
(2) 中层: 两名操作者测量值分别为 157.78 (126.97, 177.22) mg/cm^3 、155.76 (124.26, 175.67) mg/cm^3 ; 两名操作者对股骨头中层的测量结果差异无统计学意义 ($P = 0.05$)。
(3) 下层: 两名操作者测量值分别为 146.60 (112.35, 171.69) mg/cm^3 、141.44 (111.20, 167.70) mg/cm^3 ; 两名操作者对股骨头下层的测

量结果差异无统计学意义($P>0.05$)。

2.2 QCT 测量同一患者的双侧股骨头相对应层面的松质骨 vBMD 的差异性研究

两名操作者分别独立的测量 B 组患者的双侧股骨头上、中、下 3 个层面的股骨头骨松质的 vBMD 值,汇总数据后计算并记录测量的平均值,结果见表 2。(1)上层:左、右两侧的 vBMD 分别为(167.72 ± 47.96) mg/cm^3 、(169.03 ± 47.88) mg/cm^3 ,同一患者双侧的股骨头上层的松质骨 vBMD 的差异无统计

学意义($P>0.05$)。(2)中层:左、右两侧的 vBMD 分别为(182.37 ± 48.39) mg/cm^3 、(177.25 ± 50.79) mg/cm^3 ,同一患者双侧的股骨头中层的松质骨 vBMD 的差异有统计学意义($P<0.05$)。(3)下层:左、右两侧的 vBMD 分别为(171.49 ± 49.07) mg/cm^3 、(162.14 ± 51.22) mg/cm^3 ,同一患者双侧的股骨头下层的松质骨 vBMD 的差异有统计学意义($P<0.05$)。

表 1 两名操作者测量股骨头上、中、下 3 个层面的股骨头骨松质的体积骨密度结果

Table 1 VBMD results of 2 operators measuring cancellous bone on the upper, middle and lower layers of femoral head

分类		算术均值 /(mg/cm^3)	中位数 /(mg/cm^3)	上、下四分位数 /(mg/cm^3)	Shapiro- Wilk Test	Wilcoxon Signes Ranks Test		Paired-Sample T Test	
						Z 值	P 值	T 值	P 值
上层	操作者 1	142.70 $\pm$ 36.34	139.73	(117.69,164.84)	0.009	-1.446	0.148	—	—
	操作者 2	140.92 $\pm$ 36.21	138.69	(114.70,165.12)					
中层	操作者 1	156.07 $\pm$ 42.61	157.78	(126.97,177.22)	0.755	—	—	1.978	0.050
	操作者 2	154.83 $\pm$ 42.25	155.76	(124.25,175.67)					
下层	操作者 1	144.41 $\pm$ 44.45	146.60	(112.35,171.69)	0.000	-1.658	0.097	—	—
	操作者 2	142.43 $\pm$ 43.80	141.44	(111.20,167.70)					

表 2 QCT 测量同一患者的双侧股骨头骨松质的 vBMD 结果

Table 2 Volumetric cancellous BMD results of bilateral femoral head in the same patient by QCT

类别		算术均值 /(mg/cm^3)	中位数 /(mg/cm^3)	上、下四分位数 /(mg/cm^3)	Shapiro- Wilk test	Wilcoxon Signes Ranks Test		Paired-Sample T Test	
						Z 值	P 值	T 值	P 值
上层	左	167.72 $\pm$ 47.96	166.30	(132.07,197.52)	0.002	-0.746	0.445	—	—
	右	169.03 $\pm$ 47.88	164.31	(135.57,204.17)					
中层	左	182.37 $\pm$ 48.39	179.49	(143.64,217.19)	0.013	-3.787	0.000	—	—
	右	177.25 $\pm$ 50.79	170.30	(139.75,218.76)					
下层	左	171.49 $\pm$ 49.07	169.79	(135.30,201.91)	0.829	—	—	5.212	0.000
	右	162.14 $\pm$ 51.22	159.10	(124.53,197.99)					

3 讨论

随着社会老龄化问题的加剧,髋部骨折已经成为危害老年人生活质量及生命健康的重要危险因素。股骨颈骨折和股骨粗隆间骨折多数为低能量损伤,主要发生于骨质疏松的老年人。在过去的 20 年中,医学影像学作为一种非侵入性的方法,其发展使之已成为科研人员和临床医生日益重要的工具。

DXA 是一种基于 X 线的技术,可以准确地测量特定部位(腰椎、髋部和前臂远端)的 aBMD。但 DXA 在临床工作中的应用存在如下缺点:(1)用 DXA 测量髋部 BMD 时需要患者摆放特定的体位,髋关节骨折以及椎体骨折患者往往难以完成;(2)DXA 是二维平面测量,测量结果为 aBMD,其无法准确测量某一特定区域内的 vBMD,并且很难分辨出那些由于退行性病变引起的 aBMD 增高的骨质疏松

的患者;(3)由于髋臼与股骨头的重叠,使得目前髋关节 DXA 的 ROI 不包含股骨头(一般为股骨颈、股骨转子、股骨转子间和全髋关节)。

QCT 是一种三维非投影技术,能够从 CT 图像数据中计算出诸如体积和密度等的特定参数,用于量化脊柱、股骨近端、前臂和胫骨的 vBMD,是了解骨的数量及质量的强有力工具,并具有其他密度测量技术所不具备优点:(1)可以较好地地区分皮质骨和松质骨;(2)ROI 的松质骨含量受退行性变的影响小;(3)可以提供三维解剖结构和密度等信息。在理想情况下,QCT 测量的 vBMD 结果的精确度误差为 1.5%~3.0%,优于 DXA^[1-2]。相对于 DXA 的二维成像,QCT 的三维成像是其主要优势,这一优势使得 QCT 能够对骨的特定位置的改变进行量化。QCT 的扫描部位包括腰椎、髋部和胫骨。在 QCT 检查中,vBMD 评估大多数是对松质骨的测量,因为松

质骨的转换速度比皮质骨快得多(松质骨的骨代谢活性约为皮质骨的8倍),这对于监测疾病的发展和治疗后的变化更敏感^[3-6]。与髋关节相比,脊柱的松质骨比例更大。因此,在《原发性骨质疏松症诊疗指南(2017)》中,推荐使用QCT测量椎体的vBMD来预测绝经后妇女椎体骨折风险以及骨质疏松药物疗效观察^[7-8]。而股骨头也含有较大比例的松质骨,并且脆性骨折很少涉及股骨头,同时在治疗髋部骨折时使用的内固定物,其在股骨头中的位置、深度以及术后是否发生并发症等均与股骨头骨质的良好与否有关^[9]。有研究显示,髋部骨折和非髋部骨折患者之间的松质骨BMD的差异远高于二者之间皮质骨的差异,在骨质疏松骨量减少的情况下,增加骨小梁的强度可以改良骨的“结构性冗余”,从而提高发生骨折的阈值,说明松质骨对于预防骨折的重要性^[10-11]。虽然皮质骨在髋部骨折中起到重要的作用,但是当股骨粗隆和股骨颈部的骨小梁强度不足以抵抗跌倒所带来的额外负荷时,骨皮质才参与其中,并且一旦皮质骨受累,在组织水平上皮质骨与松质骨对抵抗负荷所做的贡献是相同^[12-13]。因此,对股骨头内的松质骨测量很有意义。目前,QCT是唯一能够对股骨头BMD进行评估的方法。然而因为目前软件条件限制,测量股骨头BMD的ROI多数为垂直于股骨颈长轴的平面(如QCT Pro软件中的“CTXA Hip Exam Analysis”软件分析模块),同时多数研究是对尸体的股骨头或离体的股骨头进行的,这些测量方式对临床的指导意义有限^[14]。本研究创新性地应用QCT Pro软件中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块,将测量椎体骨密度的方法应用于测量股骨头中平行于股骨颈长轴的不同平面ROI的松质骨vBMD值。

在本研究中,2名操作者分别独立测量A组患者的单侧股骨头上、中、下3个层面的股骨头的松质骨vBMD。结果显示,2名操作者测量同一股骨头的相同位置的松质骨vBMD数值差异无统计学意义(上层: $Z = -1.446, P > 0.05$;中层: $t = 1.978, P = 0.05$;下层: $Z = -1.658, P > 0.05$),证明了将QCT Pro软件中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块应用在股骨头测量方面具有可重复性强的特点。虽然测量结果会因为ROI的手动放置而造成测量结果不稳定,但经过培训,不同操作者之间的测量差异无明显统计学意义,这为后续在体股骨头方面的研究提供了新的方法。

在对B组患者进行双侧股骨头相同位置的松

质骨vBMD差异性的研究中,发现同一患者的两侧股骨头的上层vBMD差异无统计学意义($Z = -0.764, P > 0.05$),但两侧的股骨头的中层和下层vBMD差异有统计学意义(中层: $Z = -3.787, P < 0.05$;下层: $t = 5.212, P < 0.05$),且两个层面的vBMD均为左侧大于右侧[左侧中层为 $(182.37 \pm 48.39) \text{ mg/cm}^3$,右侧中层为 $(177.25 \pm 50.79) \text{ mg/cm}^3$,左侧下层为 $(171.49 \pm 49.07) \text{ mg/cm}^3$,右侧下层为 $(162.14 \pm 51.22) \text{ mg/cm}^3$],出现该差异的原因尚不清楚,且报告双侧股骨近端骨密度存在差异的文献较少。Wu等^[15]利用DXA对女性体操运动员双侧股骨近端骨密度的测量中发现,体操运动员的左侧股骨近端的aBMD高于右侧,且正式队员(训练时间为28 h/周)的双侧差异较替补队员(训练时间为12 h/周)的更明显,但运动员的两侧下肢肌力并未发现明显差异。研究者推测其原因可能是体操运动员使用左腿起跳,右腿着陆,这种作用力方式的不同导致了两侧股骨近端aBMD的差异。考虑到骨密度与加载于骨骼上的负荷有关,并且近年来越来越多的研究将肌肉与骨骼看作是紧密联系一个整体^[16-18]。骨骼与肌肉在生长和运动的综合功能上深度整合,二者在器官、细胞和分子的层面上互相影响,肌-骨单位(bone-muscle unit)正是源于此^[19-21]。Valentin等^[22]在利用MRI对躯干肌肉的测量中就发现,在成人身体(45~60岁)中,左侧的竖脊肌和腹直肌均比右侧的体积大,但这种现象在年轻群体(18~25岁)中表现不明显。由此推测,人群存在优势侧,并且在日常生活中,人的身体两侧会因为姿势或运动等原因导致受力并不完全相同,这种长期的受力不均衡以及两侧肌肉含量不同可能是导致人的两侧股骨头的骨密度存在差异的原因,该问题有待未来进一步探讨。

本研究尚存在一定的局限性:(1)本研究考虑到股骨颈骨折患者因其股骨颈的移位,寻找股骨颈轴线的误差较大,故将股骨颈骨折的受试者纳入A组,仅测量未发生骨折一侧的股骨头的vBMD值。因此,将QCT Pro软件中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块应用于股骨颈骨折患者的骨折侧的可重复性尚未确定;(2)本次研究为回顾性研究,未收集到患者优势侧位置等信息,因此未能研究同一患者双侧股骨头vBMD差异的原因;(3)该测量方法目前为完全人工调整图像方位以及ROI位置,有待技术人员开发相应的程序进一步减少因手动调整所带来的误差。

综上,将 QCT Pro 软件中“3D Spine Exam Analysis”软件分析模块应用于测量股骨头骨密度的方法是一种可重复性高的且有较高临床价值的方法,理论上对于 QCT 可扫描到的骨头的松质骨均可以测其 vBMD 值,值得推广。同时,受试者双侧股骨头 vBMD 存在差异的现象仍有待进一步的研究。

【 参 考 文 献 】

- [1] Mao SS, Li D, Luo Y, et al. Application of quantitative computed tomography for assessment of trabecular bone mineral density, microarchitecture and mechanical property [J]. Clin Imaging, 2016,40(2):330-338.
- [2] Lewiecki EM, Binkley N, Morgan SL, et al. Best practices for dual-energy X-ray absorptiometry measurement and reporting: International society for clinical densitometry guidance [J]. Journal of Clinical Densitometry, 2016,19(2):127-140.
- [3] Hsu P, Tsai M, Wang S, et al. Cortical bone morphological and trabecular bone microarchitectural changes in the mandible and femoral neck of ovariectomized rats [J]. PLoS One, 2016,11(4):e154367.
- [4] Sandberg OH, Aspenberg P. Inter-trabecular bone formation: a specific mechanism for healing of cancellous bone [J]. Acta Orthopaedica, 2016,87(5):459-465.
- [5] Fahrleitner-Pammer A, Burr D, Dobnig H, et al. Improvement of cancellous bone microstructure in patients on teriparatide following alendronate pretreatment [J]. Bone, 2016,89:16-24.
- [6] Björnerem Å. The clinical contribution of cortical porosity to fragility fractures [J]. Bone Key Reports, 2016,5:846.
- [7] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会.原发性骨质疏松症诊疗指南(2017) [J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2017,10(5):413-444.
- [8] Wang J, Stein EM, Zhou B, et al. Deterioration of trabecular plate-rod and cortical microarchitecture and reduced bone stiffness at distal radius and tibia in postmenopausal women with vertebral fractures [J]. Bone, 2016,88:39-46.
- [9] Munemoto M, Kido A, Sakamoto Y, et al. Analysis of trabecular bone microstructure in osteoporotic femoral heads in human patients: in vivo study using multidetector row computed tomography [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2016, 17(1):13.
- [10] Bousson VD, Adams J, Engelke K, et al. In vivo discrimination of hip fracture with quantitative computed tomography: Results from the prospective European Femur Fracture Study (EFFECT) [J]. J Bone Mineral Res, 2011,26(4):881-893.
- [11] Fields AJ, Nawathe S, Eswaran SK, et al. Vertebral fragility and structural redundancy [J]. J Bone Mineral Res, 2012,27(10):2152-2158.
- [12] Nawathe S, Akhlaghpour H, Boussein ML, et al. Microstructural failure mechanisms in the human proximal femur for sideways fall loading [J]. J Bone Mineral Res, 2014, 29(2):507-515.
- [13] Poole KES, Skingle L, Gee AH, et al. Focal osteoporosis defects play a key role in hip fracture [J]. Bone, 2017,94:124-134.
- [14] Yi C, Wang M, Wei J, et al. Preoperative QCT assessment of femoral head for assessment of femoral head bone loss [J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2017, 13(4):1470-1474.
- [15] Wu J, Ishizaki S, Kato Y, et al. The side-to-side differences of bone mass at proximal femur in female rhythmic sports gymnasts [J]. J Bone Mineral Res, 1998, 13(5):900-906.
- [16] Laurent MR, Dubois V, Claessens F, et al. Muscle-bone interactions: From experimental models to the clinic? A critical update [J]. Molecular and Cellular Endocrinology, 2016,432:14-36.
- [17] Huovinen V, Ivaska KK, Kiviranta R, et al. Bone mineral density is increased after a 16-week resistance training intervention in elderly women with decreased muscle strength [J]. Eur J Endocrinol, 2016,175(6):571-582.
- [18] Villareal DT, Aguirre L, Gurney AB, et al. Aerobic or resistance exercise, or both, in dieting obese older adults [J]. New Engl J Med, 2017,376(20):1943-1955.
- [19] Lee I, Ha C, Kang H. Association of sarcopenia and physical activity with femur bone mineral density in elderly women [J]. J Exerc Nutrition Biochem, 2016,20(1):23-29.
- [20] Karsenty G, Olson EN. Bone and muscle endocrine functions: unexpected paradigms of inter-organ communication [J]. Cell, 2016,164(6):1248-1256.
- [21] Reginster J, Beaudart C, Buckinx F, et al. Osteoporosis and sarcopenia [J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2016,19(1):31-36.
- [22] Valentin S, Licka T, Elliott J. Age and side-related morphometric MRI evaluation of trunk muscles in people without back pain [J]. Manual Therapy, 2015,20(1):90-95.

(收稿日期:2018-06-29;修回日期:2019-01-03)