

论 著

CT影像学ONFH患者不同测量层面股骨头HU的观察研究*

张桂鑫^{1,2} 张 婕⁴ 陈志健²
郑春红³ 杨 锋¹ 彭 磊²
赵 宇¹ 龚春柱^{1,*} 张 乐⁵

- 1.深圳平乐骨伤科医院(深圳市坪山区中医院) (广东 深圳 518000)
2.广州中医药大学 (广东 广州 510405)
3.广州中医药大学第三附属医院 (广东 广州 510405)
4.汕头潮南民生医院 (广东 汕头 515100)
5.湖南中医药大学 (湖南 长沙 410000)

【摘要】目的 分析CT影像学四种不同测量层面股骨头HU的差异及与骨密度相关性，初步探究HU评估ONFH股骨近端骨质的适宜层面。方法 回顾性分析2020-2022年115例(188髋)就诊于广州中医药大学第三附属医院股骨头坏死诊疗中心ONFH患者的CT图像，利用ONIS 2.5 PACS阅读软件分别测量四种观测层面下股骨头的HU，比较不同测量层面股骨头HU间差异并评估与骨密度相关性。结果 1.常规CT股骨头不同测量层面的HU间具有统计学差异($P<0.05$)，ARCO II期不同测量层面的股骨头HU无统计学差异($P>0.05$)；ARCO III期不同测量层面股骨头HU存在统计学差异($P<0.05$)。2.股骨头各测量层面HU与骨密度均显著正相关，其中以正中层面相关性最佳($r_s=0.536$)，ARCO II期股骨头全层面HU与BMD的相关性最为紧密($r_s=0.614$)，ARCO III期股骨头正中层面HU与BMD相关性最为紧密($r_s=0.500$)。结论 常规CT测量层面选择对股骨头HU评估ONFH头内的骨质情况存在影响，正中层面可能是初步评估股骨头内稳定与骨质情况的最优选择。针对不同阶段头内骨质情况简易评估选择，ARCO II期宜选取正中层面，前正中层面更适用于ARCO III期患者。

【关键词】股骨头坏死；双能X线吸收法；亨斯菲尔德单位；骨密度；骨质疏松
【中图分类号】R681
【文献标识码】A
【基金项目】广东省中医药管理局项目(202205121615112770)；
深圳市“医疗卫生三名工程”项目资助(SZZYSM202311020)；
深圳市坪山区卫生健康系统科研项目(2023223)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.12.055

Observational Study of Femoral HU at Different Measurement Levels in Patients with ONFH on CT Imaging*

ZHANG Gui-xin^{1,2}, ZHANG Jie⁴, CHEN Zhi-jian², ZHENG Chun-hong³, YANG Feng¹, PENG Lei², ZHAO Yu¹, GONG Chun-zhu^{1,*}, ZHANG Le⁵.
1.Shenzhen Pingle Orthopedic Hospital (Shenzhen Pingshan Traditional Chinese Medicine Hospital), Shenzhen 518000, Guangdong Province, China
2.Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong Province, China
3.The Third Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong Province, China
4.Shantou Chaonan Minsheng Hospital, Shantou 515100, Guangdong Province, China
5.Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410000, Hunan Province, China

ABSTRACT
Objective Preliminary investigation of the appropriate level of HU for assessing proximal femoral bone quality in ONFH by analysing the differences in femoral HU and correlation with bone density at four different measurement levels on CT imaging. **Methods** We retrospectively analysed the CT images of 115 patients (188 hips) who attended the ONFH Centre of Necrosis of the Femoral Head of the Third Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine from 2020 to 2022, measured the HU of the femoral head at four observation levels in ONIS 2.5 PACS software, compared their differences and evaluated the correlation with bone mineral density. **Results** 1. There was a statistical difference between the HUs at different measurement planes of the femoral head in conventional CT ($P<0.05$), and no statistical difference between the HUs at different measurement planes of the femoral head in ARCO II ($P>0.05$); there was a statistical difference between the HUs at different measurement planes of the femoral head in ARCO Stage III ($P<0.05$). 2. HU and BMD were significantly and positively correlated at all measured levels of the femoral head, with the best correlation at the mid-head plane ($r_s=0.536$), the strongest correlation between HU and BMD at the full-head plane in ARCO II ($r_s=0.614$), and the strongest correlation between HU and BMD at the mid-head plane in ARCO II ($r_s=0.500$). **Conclusion** The selection of a conventional CT measurement plane affects the assessment of femoral HU for bone quality in the ONFH head. The median plane may be the optimal choice for initial assessments of stability and bone quality in the femoral head. For straightforward assessments of bone quality in the head at different stages, the median plane is suitable for ARCO II, while the anterior median plane is more appropriate for ARCO III patients.
Keywords: Femoral Head Necrosis; Dual-energy X-ray Absorptiometry; Hunsfield Unit; Bone Density; Osteoporosis

塌陷是ONFH预后不良的标志，股骨头正常力学性能下降及稳定结构严重破坏引起的疼痛及功能障碍导致关节置换手术节点显著提前。骨吸收起始理论认为以破骨细胞介导的骨吸收主导下坏死-修复进程是塌陷的关键。围塌陷期头内特征性骨吸收重构表型使得利用骨密度来评估塌陷风险成为可能。DXA及其配套软件价格高昂，常规CT的无量纲单位--亨斯菲尔德单位(hounsfield unit, HU)一定程度上可以作为BMD的有效替代指标，但目前学界对于股骨头骨质评估观测层面选择尚未统一，我们评估了常用观测层面股骨头HU差异及其与股骨头BMD相关性，旨在指导股骨近端骨质情况和塌陷风险的临床评估层面选择。

1 资料与方法

1.1 一般资料 参照ONFH诊断共识及指南^[1-3]，回顾性收集2020年1月至2022年8月115例就诊于广州中医药大学第三附属医院股骨头坏死诊疗中心ONFH患者(男78例(67.83%)，女37例(32.17%))，年龄14-81岁(38.90±13.15)，以双侧坏死为主(85例)，激素性55例，酒精性35例，病因未明者25例，ARCO II期55例(47.83%)，ARCO III期60例(52.17%)。所有病例均接受一次髋关节CT平扫及三维重建和DXA检查。
纳入标准：年龄≥14岁，经影像学明确诊断为ONFH；影像学ARCO分期属于ARCO II期和III期。排除标准：合并严重心脑血管疾病、代谢性疾病、肿瘤、活动性感染及其他严重内科疾病者；观测区存在明确骨关节炎、骨折或肿瘤占位征象者；患侧接受过减压、打压植骨、微血管灌注等保髋手术及其他内植入手术者；测量区存在明显亮斑、伪影、缺损者；重要临床及影像资料不全者；拒绝回访检查者。研究通过广州中医药大学伦理审查中心审查，入组患者均已知晓研究涉及信息内容并签署知情同意书。
1.2 仪器与方法 入组患者均完成一次髋关节常规CT平扫与三维重建(广州中医药大学第三附属医院放射科;扫描仪：Toshiba, Aquilion TSX-101A X射线计算机断层摄影设备，64排128层，Japan，设备编号：322110500002；预设参数：管电压120kV，管电流50mA，曝光时间5.0s；窗宽2700，窗位350，层厚2.0mm，层间距1.0)并在入组

【第一作者】张桂鑫，男，中医师，主要研究方向：骨科。E-mail: 20201120454@stu.gzucm.edu.cn
【通讯作者】龚春柱，男，主任中医师，主要研究方向：骨科。E-mail: gcqz_82@126.com

或回访中完成同侧股骨头BMD检查(广州中医药大学第三附属医院骨密度室;扫描仪:Hologic Horizon-A双能X线骨密度仪,America,设备编号:021100200001)。

1.3 PACS图像预处理及ROI测量 常规CT配套的PACS阅览软件完成对入组病例髋关节冠状位三维重组(层间距:1mm,图1A)并以原始DICOM和PNG格式分别导出后导入ONIS 2.5 PACS阅览软件,采用Ellipse/Polygen曲线拟合功能完成ROI选取,依次完成全层面(WP)、正中层面(MP)、前正中层面(AMP)和最大坏死层面(MNP)股骨头HU(图1B,WP为股骨头所有测量层面HU的均值;MP和AMP参照全层面重组图像顺序筛选,总层面为奇数时选取正中层面及前后各一层面进行HU均值测量;总层面为偶数时选取前后各一层面测量;MNP由1名高年资临床医师和影像医师识别并统一)。

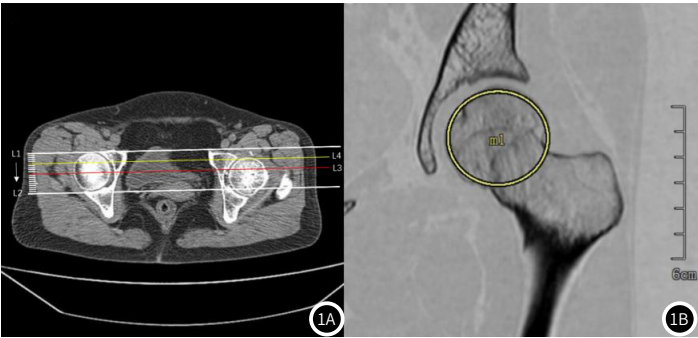


图1A-图1B 层面选取/ROI绘制。注:L1→L2(白):平行于投射底板,由股骨头前方骨皮质向后方骨皮质行冠状位重组;L3(红):股骨头冠状位正中层面切线;L4(黄):股骨头冠状位前正中层面切线;M1:与股骨头骨皮质内侧缘贴近的最大近似圆。

1.4 统计学分析 统计学分析采用SPSS 27.0完成,计量资料以

“均数+标准差”($\bar{x} \pm s$)描述。股骨头HU与BMD的相关性以相关系数(rs)表示,根据是否符合正态分布采用Pearson/Spearman相关性分析($\alpha=0.05$)。单因素方差分析各测量层面股骨头HU差异并行事后两两比较,统计学差异标准均采取 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 差异分析 经单因素方差分析不同测量层面选择股骨头HU存在差异($F=2.613, P=0.050$),事后多重比较提示除全层面与前正中层面、全层面和最大坏死层面的HU两两间比较存在统计学差异外($P=0.044^*, 0.013^*$),余各测量层面股骨头HU两两间比较无统计学差异($P>0.05$)。

分期分层分析显示ARCO II期ONFH四种测量层面的股骨头HU无统计学差异($P>0.05$),各测量层面股骨头HU间两两比较亦无统计学差异($P>0.05$)(表3、表4)。在ARCO III期中呈现出不同的结果:不同测量层面选择下股骨头HU存在差异($F=3.103, P=0.03^*$),事后多重比较显示ARCO III期ONFH股骨头全层面和前正中层面HU、股骨头全层面和最大坏死层面HU间存在统计学差异($P=0.045^*, 0.005^{**}$)。

2.2 相关性分析 相关性验证显示ONFH各测量层面股骨头HU均与BMD均呈正相关(图2),股骨头正中层面HU与BMD相关性最为紧密($rs=0.536$),股骨头全层面次之($rs=0.532$)。

影像学分期分层分析显示II期、III期ONFH不同测量层面的股骨头HU与BMD均呈显著正相关(图3、图4; $P<0.001$)。在ARCO II期患者股骨头全层面HU与BMD相关性最为紧密($rs=0.614$)(图3)正中层面次之($rs=0.605$);在ARCO III期患者中与BMD相关性最为紧密的HU测量层面为正中层面($rs=0.500$),前正中层面次之($rs=0.472$)。(图4)

表1 不同测量层面股骨头HU方差分析

	分组				F	p
	WP(n=188)	AMP(n=188)	MNP(n=188)	MP(n=188)		
HU	375.04±74.68	391.85±82.98	395.76±86.61	381.38±77.64	2.613	0.050

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

表3 ARCO II期ONFH四种测量层面HU值方差分析

	分组(平均值±标准差)				F	p
	WP(n=94)	AMP(n=94)	MNP(n=94)	MP(n=94)		
HU	361.75±79.53	374.34±86.56	373.98±91.87	365.02±83.46	0.521	0.668

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

表5 ARCO III期ONFH不同测量层面股骨头HU值方差分析

	分期(平均值±标准差)				F	p
	WP(n=94)	AMP(n=94)	MNP(n=94)	MP(n=94)		
HU	388.34±67.31	409.37±75.70	417.54±75.39	397.74±67.93	3.013	0.030*

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

表2 不同测量层面股骨头HU值事后多重比较

	(I)名称	(J)名称	(I)平均值	(J)平均值	差值(I-J)	p
HU	WP	AMP	375.042	391.855	-16.813	0.044*
	WP	MNP	375.042	395.756	-20.715	0.013*
	WP	MP	375.042	381.379	-6.337	0.446
	AMP	MNP	391.855	395.756	-3.902	0.639
	AMP	MP	391.855	381.379	10.476	0.208
	MNP	MP	395.756	381.379	14.377	0.084

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

表4 ARCO II期ONFH不同层面股骨头HU值事后多重比较

	(I)名称	(J)名称	(I)平均值	(J)平均值	差值(I-J)	p
HU	WP	AMP	361.746	374.341	-12.596	0.313
	WP	MNP	361.746	373.977	-12.232	0.327
	WP	MP	361.746	365.017	-3.271	0.793
	AMP	MNP	374.341	373.977	0.364	0.977
	AMP	MP	374.341	365.017	9.325	0.455
	MNP	MP	373.977	365.017	8.960	0.473

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

表6 ARCO III期ONFH不同测量层面股骨头HU值事后多重比较

	(I)名称	(J)名称	(I)平均值	(J)平均值	差值(I-J)	p
HU	WP	AMP	388.338	409.368	-21.030	0.045*
	WP	MNP	388.338	417.535	-29.198	0.005**
	WP	MP	388.338	397.741	-9.403	0.369
	AMP	MNP	409.368	417.535	-8.167	0.435
	AMP	MP	409.368	397.741	11.627	0.267
	MNP	MP	417.535	397.741	19.794	0.059

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

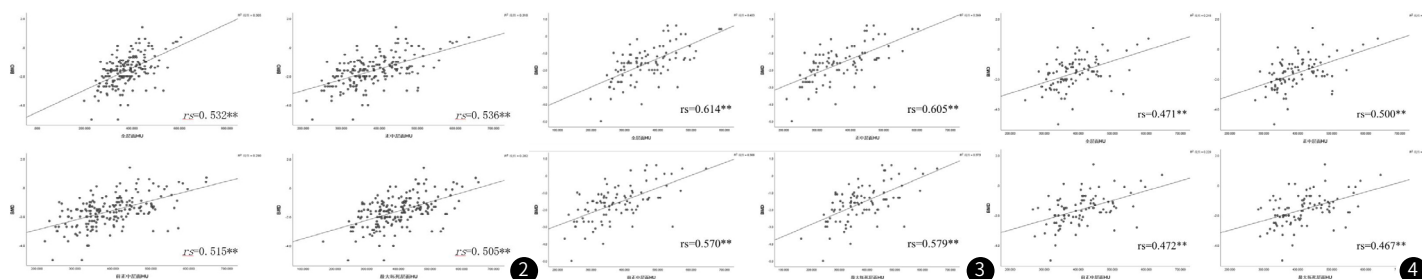


图2 四种测量层面股骨头HU值与BMD相关性分析散点图(注:**在0.01级别(双尾),相关性显著)。

图3 ARCO I期四种测量层面股骨头HU值与BMD相关性分析散点图注:**在0.01级别(双尾),相关性显著。

图4 ARCO III期四种测量层面股骨头HU值与BMD相关性分析散点图注:**在0.01级别(双尾),相关性显著。

3 讨论

CT/MRI多层影像的普及较X片评估有效避免重叠和遮挡效应,得以直观观察股骨头完整结构,实现冠状矢三维骨小梁结构逐层化评估并基于坏死面积、塌陷分布及形态分析有效预测塌陷风险、评估疾病进展并指导诊疗。对ONFH软骨下骨折更优越的识别检出效能使得CT成为MRI首选手段外的有效补充检查^[4-5]。DEXA便捷及低辐射剂量,仍是骨密度评估的“金标准”,相较于CT较高的辐射剂量更易为患者和医师接受^[6-9]。鉴于实践应用中同型号和不同制造商的扫描仪检查的骨模体衰减值的差异,国际临床密度学会暂不推荐机会性CT的HU作为BMD常规检查评估及评定的首要推荐方案^[10-11]。然在合并退行性骨关节病、椎体压缩性骨折和血管钙化等场景下,尤其在合并复杂基础疾病老年人群中DEXA往往会出现BMD值错误升高^[12],基于骨小梁计算的HU获取的BMD评定具有不受上述场景干扰的独特优势。CT的HU差异更多受光电和康普顿相互作用下管电压和骨小梁髓内脂肪组织含量影响^[13-18],故近年来出现了与以往相左的观点:单一医疗机构恒定的管电压测量标准使得HU具有极高潜力成为BMD评定常规检测。

HU是以测量组织衰减系数线性变换的无量纲单位,其信号和数值随组织密度而变化。Schreiber等^[19-21]最早报道并推荐常规CT腰椎椎体松质骨HU作为椎体松质骨等局部骨组织DEXA评定的潜在替代工具以评估骨折风险、骨质疏松诊断及治疗方案。大型队列研究进一步明确了HU在OP筛查领域的效能^[22],除骨骼基本机构评估外,其对股骨近端、腕部、肱骨近端甚至膝关节等部位的局部骨质疏松改变和骨折风险评估均有良好价值^[23-30]。与ONFH的有关研究股骨近端特定皮质部位的HU与髌关节BMD显著正相关^[31-32],可用于OP筛查和临床结局预测。HU能有效评估接受髓芯减压植骨术后植骨区和负重面皮质骨、松质骨区及邻近区的骨密度情况^[33]。Baba等^[28]发现冠状面股骨头1/3的HU可作为股骨头骨密度的重要参考,进一步研究指出术前低HU可能与关节置换术中骨折风险增加相关^[34]。我们的研究显示与以往研究相似的结果:ONFH不同进展阶段股骨头各测量层面的HU与BMD保持了良好的正相关性。尽管对不同测量层面股骨头HU随访研究尚未开展,综合现有数据与前人的研究成果,HU作为评价股骨头近端骨密度的有效替代方法具有良好可行性。

现阶段对ONFH进展评估观测层面选择仍有争议,JIC基于最大应力承载生物力学较早提出冠状位正中层面特异性ONFH诊断及分期意见^[35],我国指南同样推荐JIC坏死面积评价法并建议根据累及层面数作坏死体积评估。然临床观察显示正中层面往往并非最大坏死层面,最大坏死层面作为坏死后的力学薄弱点更易发生塌陷,因此部分学者认为正中层面评估法存在不足。冠状位正中层面与最大坏死层面三柱结构坏死分型的横断面差异研究显示不同分型方法的塌陷率存在显著差异^[36]:病灶累及范围最大的冠状层面更能反映坏死的实际情况和预后。Cherian等^[37]认为冠状和矢状面最大坏死层面传统坏死指数算法改良评估可更好的预测塌陷,Baba^[28]进一步指出最大坏死层面股骨头近端硬化边缘比例塌陷方法。ONFH头内囊性变位置分布特征分析显示骨坏死囊

性变主要位于前外侧正常-坏死区交界处,当坏死灶超过30%甚至完全占据股骨头前外上部时塌陷率更高^[38-39]。ARCO II期前外侧坏死型不同部位亚型患者的长期随访研究显示当坏死区完全位于前外侧时塌陷率更高、塌陷时间显著缩短^[39-40]。

近年来简化的X线股骨头参数测量预测不断兴起,然而头内动静态负重力学复杂变化需将其作为一个整体综合多层影像学行病情细化和塌陷评估。测量层面选择对HU存在影响提示简化X片测量指标、单一/局限多层影像层面测量评估存在一定误差,应用HU评估ONFH股骨头骨密度有必要考虑测量层面对HU的影响。股骨头全层面与前正中层面、全层面和最大坏死层面的HU两两间比较存在差异,而股骨头最大坏死层面和前正中层面HU值间无明显差异,这一表型可能与塌陷好发于头的前外侧导致局部骨质重叠压缩相关,而股骨头前正中层面和最大坏死层面二者常高度重叠可能是导致一表型。

早期研究提示不同分期ONFH的髌关节BMD存在差异,同时头内骨吸收区、修复硬化带及囊变的分布差异可能会对测量层面选择造成影响。在验证前人HU与BMD相关性结论,明确测量层面选择差异性研究基础上,基于影像学分期的分层分析显示ARCO II期不同测量层面股骨头HU间无显著差异,对不同测量层面HU与BMD的相关性比较显示股骨头全层面HU值与BMD的相关性最佳,股骨头正中层面次之(rs=0.614, 0.605)。上述差异主要是由于围塌陷前期股骨头结构较为完整,骨质疏松、硬化及囊性变等改变细微、股骨头尚未发生塌陷,骨质无明显重叠相关。正中层面可能是全层面HU测量繁琐下II期ONFH的推荐层面。ARCO III期ONFH中不同测量层面选择股骨头HU亦存在差异提示不同观测层面选择对于坏死进展至III期ONFH股骨头骨质情况评估存在影响。全层面与前正中层面HU、全层面和最大坏死层面HU两两间存在差异,而最大坏死层面和前正中层面HU间无明显差异,这与所有入组病例的差异分析结果是相一致的。这可能是由于塌陷好发于前外侧,同时塌陷早期和塌陷后早期软骨下骨折开始出现并扩展,坏死塌陷的骨小梁重叠。而各测量层面股骨头HU与BMD的相关性比较显示正中层面测得的股骨头HU值与BMD相关更佳,前正中层面次之(rs=0.500, 0.472),因此前正中层面可能是ARCO III期较理想的观测层面。

由于ONFH发病隐匿及CT对I期病变的敏感性限制,研究中未能纳入这些患者,对更早期股骨头骨质评估更具意义。受限于单中心回顾性研究和研究条件未能对HU变化作随访研究。由于早期无统一BMD检查标准,部分病例BMD数据来源于不同测量部位(腰椎、桡骨远端等),对于较早期病例的BMD检查为回访补充完成。髌部以外的骨密度测定可能与股骨近端的实际骨密度存在差异,不能很好反映股骨近端局部的骨质疏松程度,而骨密度与CT检查间隔时间过长可能会导致实际测量骨密度值的偏倚,对研究数据可靠性评估及结论可能存在影响。

综上,常规CT的HU在不增加额外辐射、成本和扫描时间下能实现头内骨质的快速评估,不失为缺乏DEXA设备的次级和基层

医疗机构有效的替代选择。结合目前医疗资源分布及基层大型设备配置现状,常规HU测量可以作为一种机会性工具推广以识别低骨密度及高塌陷风险ONFH病例并及时转诊。

参考文献

- [1] MONT M A, SALEM H S, PIUZZI N S, et al. Nontraumatic osteonecrosis of the femoral head: where do we stand today? [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2020, 102 (12): 1084-1099.
- [2] 赵德伟, 胡永成. 成人股骨头坏死诊疗标准专家共识 (2012年版) [J]. *中华关节外科杂志 (电子版)*, 2012, 6 (3): 479-484.
- [3] 中国医师协会骨科医师分会骨循环与骨坏死专业委员会, 中华医学会骨科分会骨显微修复学组, 国际骨循环学会中国区. 中国成人股骨头坏死临床诊疗指南 (2020) [J]. *中华骨科杂志*, 2020, 40 (20): 1365-1376.
- [4] YEH L, CHEN C K H, HUANG Y, et al. Diagnostic performance of MR imaging in the assessment of subchondral fractures in avascular necrosis of the femoral head [J]. *Skeletal Radiology*, 2009, 38 (6): 559-564.
- [5] HU L B, HUANG Z G, WEI H Y, et al. Osteonecrosis of the femoral head: using CT, MRI and gross specimen to characterize the location, shape and size of the lesion [J]. *The British Journal of Radiology*, 2015, 88 (1046): 20140508.
- [6] 程晓光, 徐文坚, 吴艳, 等. 骨质疏松的影像学及骨密度诊断专家共识 [J]. *中国骨质疏松杂志*, 2020, 26 (09): 1249-1256.
- [7] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会, 章振林. 原发性骨质疏松症诊疗指南 (2022) [J]. *中国全科医学*, 2023, 26 (14): 1671-1691.
- [8] PAPADAKIS A E, KARANTANAS A H, PAPADOKOSTAKIS G, et al. Can abdominal multi-detector CT diagnose spinal osteoporosis? [J]. *European Radiology*, 2009, 19 (1): 172-176.
- [9] ALAWI M, BEGUM A, HARRAZ M, et al. Dual-energy X-ray absorptiometry (DEXA) scan versus computed tomography for bone density assessment [J]. *Cureus*, 2021, 13 (2): e13261.
- [10] LI N, LI X, XU L, et al. Comparison of QCT and DXA: osteoporosis detection rates in postmenopausal women [J]. *International Journal of Endocrinology*, 2013, 2013: 1-5.
- [11] BOOZ C, NOESKE J, ALBRECHT M H, et al. Diagnostic accuracy of quantitative dual-energy CT-based bone mineral density assessment in comparison to Hounsfield unit measurements using dual x-ray absorptiometry as standard of reference [J]. *European Journal of Radiology*, 2020, 132: 109321.
- [12] DAMILAKIS J, ADAMS J E, GUGLIELMI G, et al. Radiation exposure in X-ray-based imaging techniques used in osteoporosis [J]. *European Radiology*, 2010, 20 (11): 2707-2714.
- [13] CROPP R J, SESLIJA P, TSO D, et al. Scanner and kVp dependence of measured CT numbers in the ACR CT phantom [J]. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2013, 14 (6): 338-349.
- [14] HURRELL M A, BUTLER A P H, COOK N J, et al. Spectral hounsfield units: a new radiological concept [J]. *European Radiology*, 2012, 22 (5): 1008-1013.
- [15] GARNER H W, PATURZO M M, GAUDIER G, et al. Variation in attenuation in L1 trabecular bone at different tube voltages: caution is warranted when screening for osteoporosis with the use of opportunistic CT [J]. *American Journal of Roentgenology*, 2017, 208 (1): 165-170.
- [16] WOOTEN W W, JUDY P F, GREENFIELD M A. Analysis of the effects of adipose tissue on the absorptiometric measurement of bone mineral mass [J]. *Investigative Radiology*, 1973, 8 (2): 84-89.
- [17] NICKOLOFF E L, FELDMAN F, ATHERTON J V. Bone mineral assessment: new dual-energy CT approach. [J]. *Radiology*, 1988, 168 (1): 223-228.
- [18] MAZESS R B. Errors in measuring trabecular bone by computed tomography due to marrow and bone composition [J]. *Calcified Tissue International*, 1983, 35 (1): 148-152.
- [19] SCHREIBER J J, ANDERSON P A, ROSAS H G, et al. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2011, 93 (11): 1057-1063.
- [20] SCHREIBER J J, GAUSDEN E B, ANDERSON P A, et al. Opportunistic osteoporosis screening—gleaning additional information from diagnostic wrist CT scans [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2015, 97 (13): 1095-1100.
- [21] SCHREIBER J J, ANDERSON P A, HSU W K. Use of computed tomography for assessing bone mineral density [J]. *Neurosurgical Focus*, 2014, 37 (1): E4.
- [22] PICKHARDT P J, POOLER B D, LAUDER T, et al. Opportunistic screening for osteoporosis using abdominal computed tomography scans obtained for other indications [J]. *Annals of Internal Medicine*, 2013, 158 (8): 588.
- [23] ALACREU E, MORATAL D, ARANA E. Opportunistic screening for osteoporosis by routine CT in Southern Europe [J]. *Osteoporosis International*, 2017, 28 (3): 983-990.
- [24] ZOU D, LI W, DENG C, et al. The use of CT hounsfield unit values to identify the undiagnosed spinal osteoporosis in patients with lumbar degenerative diseases [J]. *European Spine Journal*, 2019, 28 (8): 1758-1766.
- [25] JOHNSON C C, GAUSDEN E B, WEILAND A J, et al. Using hounsfield units to assess osteoporotic status on wrist computed tomography scans: comparison with dual energy x-ray absorptiometry [J]. *The Journal of Hand Surgery*, 2016, 41 (7): 767-774.
- [26] KRAPPINGER D, ROTH T, GSCHWENTNER M, et al. Preoperative assessment of the cancellous bone mineral density of the proximal humerus using CT data [J]. *Skeletal Radiology*, 2012, 41 (3): 299-304.
- [27] ZHANG X, ZHU C X, HE J Q, et al. Correlation of CT values and bone mineral density in elderly Chinese patients with proximal humeral fractures [J]. *Orthopaedic Surgery*, 2021, 13 (8): 2271-2279.
- [28] BABA S, MOTOMURA G, IKEMURA S, et al. Is bone mineral density lower in the necrotic lesion in pre-collapse osteonecrosis of the femoral head? [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2020, 38 (11): 2434-2442.
- [29] KIM Y, LEE S, SUNG Y, et al. Assessment of osteoporosis using pelvic diagnostic computed tomography [J]. *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, 2016, 34 (4): 457-463.
- [30] CHOI K Y, LEE S, IN Y, et al. Dual-energy CT-Based bone mineral density has practical value for osteoporosis screening around the knee [J]. *Medicina*, 2022, 58 (8): 1085.
- [31] KILINC R M, AÇAN A E, TÜRK G, et al. Evaluation of femoral head bone quality by Hounsfield units: a comparison with dual-energy X-ray absorptiometry [J]. *Acta Radiologica*, 2022, 63 (7): 933-941.
- [32] XU G, WANG D, ZHANG H, et al. Prediction of osteoporosis from proximal femoral cortical bone thickness and Hounsfield unit value with clinical significance [J]. *Frontiers in Surgery*, 2023, 9: 1047603.
- [33] FAN J, LV Y, XU X, et al. Evaluation of femoral head bone quality by Hounsfield units: a predictor of implant failure for intertrochanteric fractures after intramedullary nail fixation [J]. *Frontiers in Surgery*, 2023, 9: 816742.
- [34] KIM S, PARK H, LEE D, et al. Lower preoperative Hounsfield unit values are associated with intra-operative fractures in cementless bipolar hemiarthroplasty [J]. *Archives of Osteoporosis*, 2017, 12 (1): 110.
- [35] ANDO W, SAKAI T, FUKUSHIMA W, et al. Japanese Orthopaedic Association 2019 guidelines for osteonecrosis of the femoral head [J]. *Journal of Orthopaedic Science*, 2021, 26 (1): 46-68.
- [36] 张振南, 谢利民, 于潼. 不同层面三柱结构股骨头坏死分型的差异比较研究 [J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2017, 25 (10): 28-31, 37.
- [37] CHERIAN S F, LAORR A, SALEH K J, et al. Quantifying the extent of femoral head involvement in osteonecrosis [J]. *The Journal of Bone and Joint Surgery—American Volume*, 2003, 85 (2): 309-315.
- [38] 刘光波, 马海洋, 卢强, 等. 股骨头骨坏死囊性变位置分布特征 [J]. *解放军医学院学报*, 2019, 40 (12): 1109-1113, 1137.
- [39] 赵万鹏, 林峰, 卢清萍, 等. 三维重建及有限元分析预测股骨头坏死塌陷 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24 (6): 784-787.
- [40] 魏秋实, 方斌, 陈镇秋, 等. 股骨头前外侧骨质状态在股骨头坏死塌陷进展中的作用 (英文) [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23 (16): 2516-2522.

(收稿日期: 2023-10-10)

(校对编辑: 翁佳鸿)