

论 著

股骨头坏死ARCO 2期CT征象对新发骨质吸收区预测价值分析*

史 珊¹ 杨学东^{1,*} 罗 萍¹
孙 黎¹ 谢利民^{2,*} 于 潼²
白 杨²1.中国中医科学院广安门医院放射科
(北京 100053)2.中国中医科学院广安门医院骨科
(北京 100053)

【摘要】目的 分析股骨头坏死ARCO 2期CT征象对新发骨质吸收区的预测价值。方法 回顾性分析2011年至2017年进行髋关节CT检查国际骨微循环研究协会(Association Research Circulation Osseous, ARCO)2期的股骨头坏死94例患者(F/M=24/70, 中位年龄41.0(33.3-54.0)岁)。评估初次CT检查的征象, 包括骨质坏死的位置、ARCO分期范围、密度和增生反应区的形态。根据随访3年有无骨质吸收区将病例分为新发骨质吸收组和无骨质吸收组。对比两组CT征象的差异, 并分析单一和CT征象组合对新发骨质吸收区的预测价值。结果 骨质坏死位于中外侧柱或内中外侧柱、坏死范围大于30%及增生反应区呈横行在新发骨质吸收组显著多于无骨质吸收组。CT征象组合2(骨质坏死位置、坏死范围及增生反应区呈横行形态)对新发骨质吸收区的预测价值最大, 曲线下面积(Area Under Curve, AUC)为0.79, 敏感性和特异性分别为89.13%和62.50%, 阈值>1。结论 如果骨质坏死区位于中外侧柱或内中外侧柱, 坏死范围大于30%, 且增生反应区呈横行, 则易发生骨质吸收区, 应密切随访。

【关键词】股骨头坏死; 骨质吸收; CT; ARCO 2期

【中图分类号】R617

【文献标识码】A

【基金项目】北京联影智能影像技术研究院基金
(CRIBJQY202109)中国中医科学院科技创新工程项目
(CI2021A03302和CI2021A03320)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.05.051

Predictive Value of CT Signs of ARCO Stage 2 on New Bone Resorption Lesion in ONFH*

SHI Shan¹, YANG Xue-dong^{1,*}, LUO Ping¹, SUN Li¹, XIE Li-min^{2,*}, YU Tong², BAI Yang².

1.Department of Radiology, Guang'anmen Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100053, China

2.Department of Orthopaedics, Guang'anmen Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100053, China

ABSTRACT

Objective To analyze the predictive value of CT signs for new bone resorption lesion in Association Research Circulation Osseous (ARCO) stage 2 ONFH. **Methods** Ninety four patients underwent hip CT examination with ARCO stage 2 ONFH from 2011 to 2017 were retrospectively analyzed((F/M=24/70, median age 41.0 (33.3-54.0) years old)). The signs of the initial CT examinations, including the location of the osteonecrosis, ARCO range of osteonecrosis, density of the osteonecrosis, and morphology of the necrotic-viable interface were evaluated. According to whether there was bone resorption in 3 years of follow-up, the cases were divided into new bone resorption group and no bone resorption group. The differences in CT signs between the two groups were analyzed, and the predictive values of the single and combined CT signs on the presence of new bone resorption lesion were analyzed.

Results The osteonecrosis lesion located in the central-lateral column or the medial-central-lateral column, the range of necrosis greater than 30%, and the necrotic-viable interface with morphology of transverse were significantly more in the new bone resorption group than the non-bone resorption group; the combined CT signs 2 had the greatest predictive value for new bone resorption lesion with AUC of 0.79, sensitivity and specificity are 89.13% and 62.50%, respectively, and the threshold is >1.

Conclusion If osteonecrosis lesion is located in the central-lateral column or the medial-central-lateral column, the necrosis range is greater than 30%, and the necrotic-viable interface is transverse, the bone resorption lesion is prone to occur and should be followed up closely.

Keywords: ONFH; Bone Resorption Lesion; CT; ARCO Stage 2

股骨头坏死(Osteonecrosis of the femoral head, ONFH)是由于股骨头的血供受损或中断, 导致骨细胞及骨髓成分死亡的疾病^[1]。股骨头塌陷是疾病进展的重要转折点, 通常提示预后不良^[2-3]。ONFH骨质吸收区在股骨头塌陷进程中起着重要作用^[4]。它最早出现在国际骨微循环研究协会(Association Research Circulation Osseous, ARCO)2期, 是由破骨细胞过度活动所致^[5]。既往研究提示骨质吸收区可能与负重区压力过大有关^[6]。但既往文献中, 对于股骨头坏死在何种情况下易出现骨质吸收区, 并无具体的说明。在临床上, 我们发现一些ONFH患者在随访过程中出现新的骨质吸收区, 而一些保持稳定不出现骨质吸收区。本研究的目的在于分析并确定对新发骨质吸收区有预测价值的CT征象。

1 材料和方法

1.1 一般资料 回顾性分析2011年1月至2017年10月进行髋关节CT检查的186例ARCO 2期ONFH患者, 诊断标准为中国成人股骨头坏死诊治专家共识(2016)^[7], 分期标准为ARCO2019^[8]。排除标准: 初次CT检查已出现骨质吸收区; 随访时间小于3年; 无新发骨质吸收区; 髋关节外伤史; 髋关节有创检查或手术史。186例中92例被排除: 67例在初次CT检查时有骨质吸收, 25例随访时间短于3年且无新发骨质吸收区, 最终入组94例(F/M=24/70, 中位年龄41.0(33.3-54.0)岁), 其中新发骨质吸收组48例, 无骨质吸收组46例。(病例筛选流程图见图1)。

1.2 CT扫描 所有病例均在西门子 SOMATOM Definition Flash 和 Emotion 16 CT 扫描仪上进行扫描。SOMATOM Definition Flash扫描参数为: 管电压: 140 kVp, 自动调节管电流(90-130mA), 扫描层厚: 0.75mm, DFOV: 35.6×35.6cm。Emotion 16 CT管电压: 130 kVp; 自动调节管电流(70-120mA); 扫描层厚: 0.75mm, DFOV: 38.0×38.0cm。所有髋关节均使用骨算法重建(B60s、锐利、3mm)冠状位图像。扫描时患者仰卧位, 双足处于中立位, 双髋关节同时扫描, 扫描范围从髌白顶部至股骨小转子。

1.3 CT图像评估

1.3.1 在CT冠状位骨窗图像上评估骨质坏死的位置, 根据股骨头的应力传导途径、骨小梁结构特征和骨密度分布用两条线将股骨头分为外侧柱、中间柱和内侧柱。观察冠状位所有层面的图像进行评估, 若骨质坏死位于中间柱, 评分为1分; 若骨质坏死位于中间柱和外侧柱, 评分为2分; 若骨质坏死位于外侧柱、中间柱和内侧柱, 评分为3分。

1.3.2 在CT冠状位骨窗图像上评估骨质坏死的范围, 按照ARCO1994分期方法^[9], 观察冠状位所有层面的图像进行评估, 如果骨质坏死范围小于15%, 记为1分; 若骨质坏死范围为15-

【第一作者】史 珊, 女, 主治医师, 主要研究方向: 骨肌系统影像诊断。E-mail: shishan_1987@126.com

【通讯作者】杨学东, 男, 主任医师, 主要研究方向: 骨肌系统、腹部影像诊断。E-mail: yangxuedong1@163.com

谢利民, 男, 主任医师, 主要研究方向: 股骨头坏死中医药治疗。E-mail: drxlm@126.com

30%，则记为2分；若骨质坏死范围大于30%，记为3分。

1.3.3 骨质坏死区的密度 在CT冠状位骨窗图像上，取骨质坏死区的最大层面画一个尽可能大的圆形或椭圆形感兴趣区进行测量，以 Hounsfield (HU) 为单位。

1.3.4 增生反应区的形态(横行、闭环或其他) 在CT冠状位骨窗图像上进行评估。横行和闭环的标准参考 Wu 等^[10]的研究。

所有CT征象均由一名经验丰富的放射科医师(9年工作经验，骨科系统方向)按照上述方法盲法评估。所有图像在 20 天后由同一位放射科医师和另一位放射科医师(18 年工作经验，无具体专业方向)进行盲法重复测量，以此计算评估者内和评估者间的一致性。

为了进一步提高CT征象的预测价值，我们根据单个CT征象的曲线下面积(Area Under Curve, AUC)，设置了两种CT征象组合：CT征象组合1-骨质坏死的位置和范围；CT征象组合2-骨质坏死的位置、范围，以及增生反应区的形态。根据单个CT征象预测结果中的阈值，制定CT征象组合的评分规则：骨质坏死范围评分大于2，+1；骨质坏死位置评分大于1，+1；如果增生反应区为横行，+1；如果增生反应区呈闭环，-1；其他分数记为0，最后计算总分。

1.4 分组标准 根据随访3年内有无新发骨质吸收区将病例分为新发骨质吸收组和无骨质吸收组。骨质吸收区在CT骨窗上表现为软组织密度的低密度区、边界清晰、无骨小梁分布。应与骨质坏死中的骨折相鉴别，后者表现为低密度的条带状裂隙。

1.5 统计分析 计量资料用中位数(四分位距)表示。计数资料用

计数(百分比)表示。新发骨质吸收组与无骨质吸收组性别比较采用卡方检验；两组间年龄及CT征象比较采用Mann-Whitney检验(SPSS 22.0)。用ROC曲线(Medcalc软件，18.2.1版)分析单一和CT征象组合对新发骨质吸收区的预测价值。用组内相关系数(intraclass correlation efficient, ICC)、Kappa 和加权 Kappa 分析2位放射科医师评估者内及评估者间数据的一致性。 $P < 0.05$ 具有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料 新发骨质吸收组年龄显著大于无骨质吸收组，两组间性别比例无显著性差异($P=1.000$)，见表1。

2.2 两组间CT征象比较 见表1，除骨质坏死密度($P=0.513$)外，其他两组间CT征象均有显著性差异。

2.3 骨质坏死的位置、范围 以及增生反应区的形态对新发骨质吸收均具有预测价值 其中骨质坏死范围预测价值最好，具体结果见表2。两种CT征象组合的预测结果见表2和图2。

2.4 两种CT征象组合与骨质坏死范围预测新发骨质吸收区的AUC两两比较 结果无显著性差异。(骨质坏死范围vs CT征象组合1， $P=0.339$ ；骨质坏死范围vs CT征象组合2， $P=0.153$ ；CT征象组合1 vs CT征象组合2， $P=0.076$)，但CT征象组合2预测新发骨质吸收区的AUC数值最大，其AUC为0.790，敏感性和特异性分别为89.13%和62.50%，阈值为大于1。

2.5 CT 征象的评估者内和评估者间的一致性 见表3。

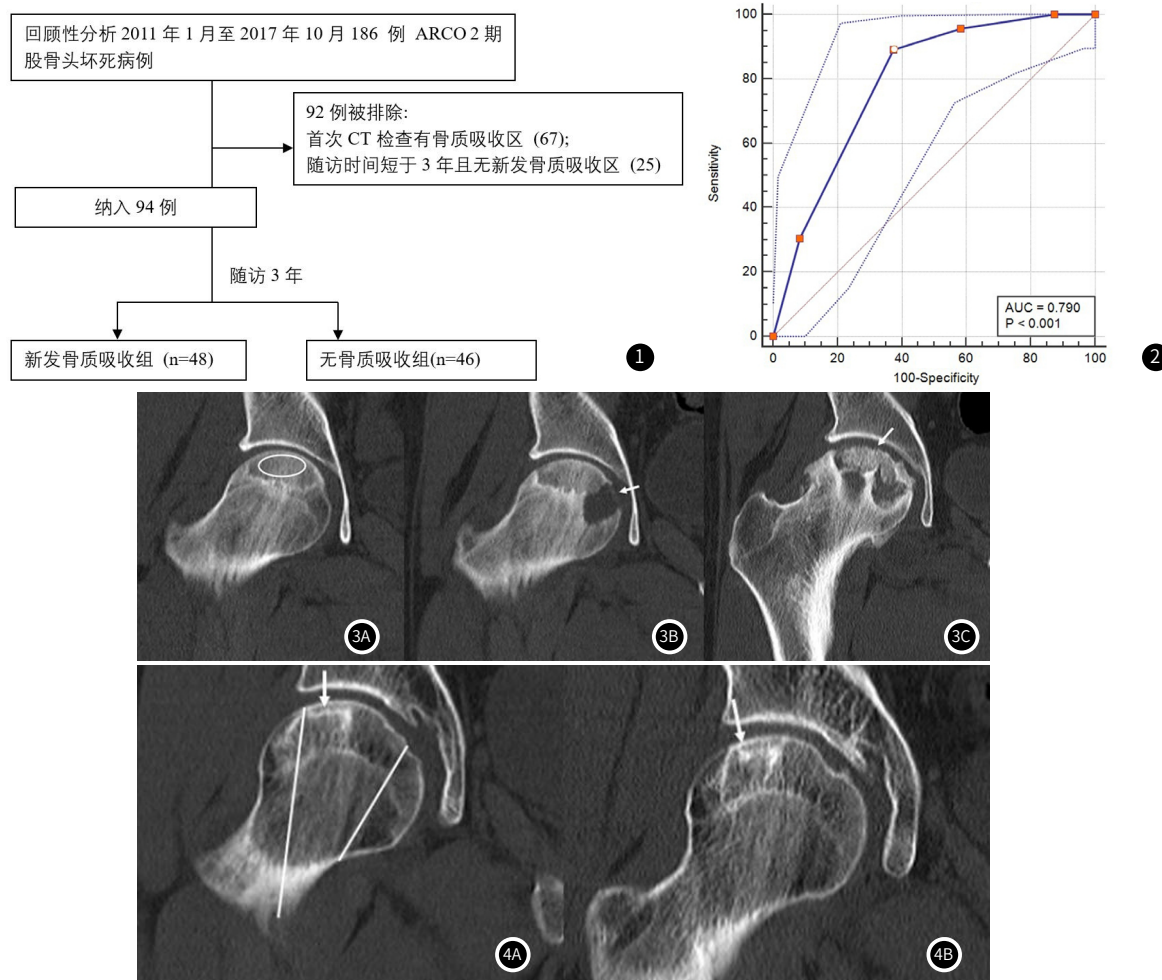


图1 病例筛选流程图。图2 CT征象组合2对预测新发骨质吸收区的ROC曲线下面积。图3 新发骨质吸收组病例随访。41岁男性，初次CT检查为股骨头坏死ARCO2期(图3A，2017-2-20，右髋关节)，无骨质吸收区，骨质坏死区位置评分2，范围评分为2，增生反应区为横行，故CT征象总评分为2分，推测会出现新的骨质吸收区；骨质坏死区密度的测量方法使用椭圆形感兴趣区表示。随访期间(图3B，2017-9-19)出现新的骨质吸收区(箭头)，与推测一致。末次随访3年余时(图3C，2020-10-5)，股骨头塌陷明显(箭头)。图4 无骨质吸收组病例随访。50岁男性，初次CT检查为股骨头坏死ARCO 2期(图4A，2016-6-16，右髋关节)，无骨质吸收区，骨质坏死区位置评分为2，范围评分为1，增生反应区呈闭环(箭头)，故CT征象总评分为0分，推测不会出现新的骨质吸收区；两条斜线显示了冠状CT上股骨头的分区。末次随访CT(图4B，2019-7-23)无新发骨质吸收区，无股骨头塌陷(箭头)，与推测一致。

表1 新发骨质吸收组及无骨质吸收组的一般资料和初次 CT 征象特征

	新发骨质吸收组(n=48)	无骨质吸收组(n=46)	统计检验值	P值
年龄(岁)	41.0(33.3-54.0)	33.5(27.0-42.0)	-2.816	0.005**
性别(女/男)	12/36	12/34	0.000	1.000
骨质坏死区的位置 (1,2,3)	1-18(37.5%) 2-7(14.6%) 3-23(47.9%)	1-1(2.2%) 2-14(30.4%) 3-31(67.4%)	-2.870	0.004**
骨质坏死区的范围 (1,2,3)	1-19(39.6%) 2-11(22.9%) 3-18(37.5%)	1-0(0.0%) 2-11(23.9%) 3-35(76.1%)	-4.487	<0.001**
骨质坏死区的密度(Hu)	389.5(329.5-469.5)	381.0(330.0-422.0)	-0.654	0.513
增生反应区呈横行	10/48(20.8%)	20/46(43.5%)	4.550	0.033*
增生反应区呈闭环	14/48(29.2%)	1/46(2.2%)	10.808	0.001**
增生反应区为其他形态	24/48(50%)	25/46(54.3%)	1.219	0.269

注：*统计学差异(P< 0.05); **显著统计学差异 (P< 0.01)。

表2 单个及CT征象组合的诊断效能

CT 征象	P值	AUC	95%置信区间	敏感性(%)	特异性(%)	阈值
骨质坏死区的位置	0.003**	0.653	0.548 -0.748	97.83	37.50	>1
骨质坏死区的范围	<0.001**	0.740	0.640- 0.825	76.09	62.50	>2
增生反应区呈横行	0.017*	0.613	0.507 -0.712	43.48	79.17	>0
增生反应区呈闭环	<0.001**	0.635	0.529 -0.732	97.83	29.17	≤0
CT征象组合1	<0.001**	0.731	0.630 -0.817	76.09	62.50	>1
CT征象组合2	<0.001**	0.790	0.694 -0.867	89.13	62.50	>1

注：*统计学差异(P< 0.05); **显著统计学差异 (P< 0.01)。

表3 评估者内及评估者间CT征象评估的一致性

CT 征象	评估者内一致性	95%置信区间	P值	评估者间一致性	95%置信区间	P值
骨质坏死区位置	0.904(加权Kappa)	0.811~0.997	<0.001**	0.715(加权Kappa)	0.557~0.873	<0.001**
骨质坏死区范围	0.787(加权 Kappa)	0.641~0.933	<0.001**	0.610 (加权 Kappa)	0.438~0.782	<0.001**
增生反应区呈横行	0.786 (Kappa)	0.608~0.963	<0.001**	0.769 (Kappa)	0.582~0.956	<0.001**
增生反应区呈闭环	0.779 (Kappa)	0.486~1.072	<0.001**	0.735 (Kappa)	0.451~1.019	<0.001**
增生反应区为其他形态	0.865 (Kappa)	0.683~1.047	<0.001**	0.788 (Kappa)	0.557~1.018	<0.001**
骨质坏死区密度	0.950(ICC)	0.926~0.967	<0.001**	0.941 (ICC)	0.913~0.960	<0.001**

注：**显著统计学差异 (P< 0.01)。

3 讨论

本研究显示CT征象组合2(骨质坏死位置、范围以及增生反应区形态)对预测新发骨质吸收区具有较大价值，阈值 >1。这是首次对预测新发骨质吸收区的CT征象进行具体分析。

研究结果发现较大的骨质坏死区更容易出现骨质吸收，这可能是由于正常骨小梁和髁部应力传递路径的破坏，从而降低了骨质坏死区的承重能力^[11]。既往研究发现骨坏死区底部应力大于表面应力^[12]，因此应力主要集中在坏死病灶与正常骨的交界处(增生反应区)，导致应力集中点异常；当峰值应力超过临界值时，会导致深部松质骨的微骨折，骨折后局部炎症刺激会引起破骨细胞过度活动，形成骨质吸收病变区^[13]。本研究结果显示新发骨质吸收区多位于增生反应区附近的坏死区，这与Fang等^[13]的研究一致。

本研究中累及外侧柱的骨质坏死区更易发生骨质吸收区。这可能是由于股骨头的应力主要集中在外侧柱^[14]，因此该区域的坏死区也承受着很大的压力。压力过大可引起骨小梁微骨折，刺激局部炎症，再加上严重的缺血缺氧刺激破骨细胞过度活动，从而促进骨质吸收区的形成^[15]。这为股骨头坏死治疗中的保护性负重提供了理论支持^[16]。

增生反应区位于坏死骨和正常骨的交界处，它是股骨头坏死的薄弱区域。闭环形态中增生反应区被正常的松质骨包围，可以辅助补偿部分应力传递，进而有效地分散应力，因此不易发生骨质吸收区。而在增生反应区呈横行时，其界面会产生应力遮挡效应，导致应力集中在薄弱区，容易导致微骨折^[17]，促进骨质吸收的形成。

在股骨头坏死修复过程中，破骨细胞和成骨细胞的活性同时增加，导致骨质净吸收^[18]。如果病情进展，坏死区营养不足和缺氧，则抑制成骨细胞的增殖，降低碱性磷酸酶活性，刺激破骨细胞、成纤维细胞、脂肪细胞和软骨细胞的增殖^[19]，致使成骨细胞和破骨细胞动态失衡，成骨不良，修复过程失败^[14]，进而发生骨质吸收，最终导致股骨头塌陷。

成骨细胞和破骨细胞之间的动态平衡受多种因素影响，受多种分子通路调控，例如与骨保护素、RANK和RANKL基因表达相关的信号通路^[20]。它们的高水平表达可以使破骨细胞活跃并导致骨质吸收、破坏，最终导致股骨头塌陷。

骨质吸收在股骨头塌陷中起关键作用。骨质吸收的出现主要与应力过载有关。病理上，骨质吸收与破骨细胞过度活动有关，因此超负荷刺激与破骨细胞活性的相关性有待进一步研究。推测超负荷刺激引起的坏死病灶的微骨折会增加股骨头坏死区的局部炎症反应，进而通过分子生物学机制促进破骨细胞再生、数量过剩。

此外，本研究发现新发骨质吸收组患者年龄显著大于无骨质吸收组，推测年龄与骨修复能力呈负相关。既往研究发现骨质再生受初始炎症微环境的影响，炎症反应随年龄增长而升高，可能会损害成骨^[20]。此外，骨修复过程中的血管化程度随着年龄的增长而减少^[21]。这些都为我们的推测提供了理论支持。

本研究存在一定的局限性：首先，本研究纳入的病例均在本院接受中药治疗，不能排除药物在随访过程中的疗效；其次，患者没有相关的临床病史和症状；再次，本研究选择随访时间点为

(下转第156页)

静脉汇入上腔静脉，再经上腔静脉注入右心房，而左、右头臂静脉在解剖形态学存在差异^[5]。右头臂静脉行程一般比较短而且较直，管径比较粗大，与邻近血管及其他组织结构无明显密切关系，血流量比较大，经右肘静脉注入对比剂后，对比剂很快就能进入到上腔静脉并汇入右心房而没有明显的静脉返流现象，这样单位时间内对比剂经肺循环后进入主动脉的浓度就会明显提高。文献报道^[6]，CTA的成像质量取决于靶血管内对比剂浓度。因此，单位时间内对比剂浓度越高，血管的强化程度就会越高，血管强化程度越高就越有利于提高血管与周围组织密度的差异，从而有利于显示血管，提高血管的图像质量^[7]。本研究经右肘静脉注入对比剂，可以使患者的主动脉全程得到更高的强化峰值，其主动脉CT值明显高于经左肘静脉注入对比剂，图像质量评价亦明显高于经左肘静脉注入对比剂。因此，经右肘静脉注入对比剂有助于提高主动脉CTA的成功率和图像质量。

而左侧头臂静脉则不同，其比右侧头臂静脉要长。左侧头臂静脉自起自左锁骨胸骨端的后方后即向右下走行于胸骨后方与左侧锁骨下动脉、左侧颈总动脉、头臂干或主动脉弓的前方之间，然后再汇入上腔静脉。因此，左侧头臂静脉与上述结构关系密切，特别是在中老年人主动脉迂曲扩张时或胸骨后间隙变窄时易受上述毗邻动脉的压迫。当利用高压注射器经左侧肘静脉大剂量短时间内快速团注对比剂时，对比剂就会经腋静脉、锁骨下静脉迅速地、大流量地经过左侧头臂静脉，当其流量超过左侧头臂静脉狭窄段流量上限时，就会导致对比剂逆流进入左侧颈静脉、周围静脉及其他侧支静脉，导致这些静脉充盈大量对比剂，单位时间内经左侧头臂静脉注入上腔静脉、右心房的实际对比剂剂量就会明显小于注射速率^[8]，参加肺循环的对比剂剂量就会相应地明显减少，单位时间内对比剂在主动脉腔内的浓聚强度就会明显降低，从而影响图像质量^[9]，甚至检查失败。文献报道^[10]，大量对比剂残留在锁骨下静脉或头臂静脉中易导致X射线无法穿透而产生静脉硬束伪影影响图像质量；对比剂的迟滞也易造成上腔静脉内对比剂持续存在而导致放射状束化伪影影响图像质量^[11]。本组

经左肘静脉注入对比剂，主动脉强化程度就明显低于经右肘静脉注入对比剂，图像优良率亦低于经右肘静脉注入对比剂，图像质量评价差异具有统计学意义。

当然，本研究不足之处在于是单中心研究，收集的样本量较少，结论可能存在偏倚，需要进一步扩大病例数并进行多中心研究以进一步验证本研究结论。

总之，在进行主动脉CTA检查时，为确保检查能圆满完成并获得高质量的主动脉图像，除患者右肘穿刺部位感染、术后或肿瘤压迫、侵犯等特殊情况下，应尽量选择经右侧肘静脉注入对比剂。

参考文献

- [1] 徐彦东, 张凤翔, 张浩亮, 等. CT血管成像在大动脉炎诊断中的价值[J]. 实用放射学杂志, 2020, 36(12): 1994-1996.
- [2] 付传明, 陈伦刚, 陈文, 等. 对比剂注射方案优化联合低管电压在主动脉CTA中的探讨[J]. CT理论与应用研究, 2019(4): 447-454.
- [3] 帅桃, 游永春, 李万江, 等. 宽体探测器CT冠脉联合头颈部及主动脉CT血管成像“一站式”扫描的应用价值[J]. 重庆医科大学学报, 2019, 44(10): 1323-1326.
- [4] 白文辉, 易银萍, 张红梅, 等. 含碘非离子对比剂输注前预防静脉外渗策略的证据总结[J]. 护理研究, 2020, 34(24): 4350-4355.
- [5] 杨吉平, 李浩旭. 上腔静脉及其属支变异1例[J]. 中国临床解剖学杂志, 2021, 39(4): 501.
- [6] 王萌, 王西宾, 薛斌, 等. 双源CT大螺距技术和典范伦400在主动脉血管成像中的应用价值[J]. 实用放射学杂志, 2018, 34(12): 1956-1969.
- [7] 吴晶晶, 曹福顺, 余荣, 等. CT血管成像对咯血患者支气管动脉及相关责任血管检测能力的评估[J]. 实用放射学杂志, 2019, 35(2): 212-219.
- [8] 马爱新, 刘强, 赵卫东. 左右肘静脉注射对比剂对肺动脉CT成像效果的对比研究[J]. 中国药物与临床, 2018, 18(1): 43-44.
- [9] 陈丹, 瞿中威, 张亚林, 等. 头颈部CT增强中造影剂静脉返流征象及预防[J]. 中国CT和MRI杂志, 2012, 10(3): 24-26.
- [10] 徐华林, 周寒松, 陈万洪, 等. 经左右肘静脉注射造影剂对颈部CTA检查的影响[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(5): 82-88.
- [11] 孙利芳, 陈志平, 时胜利. 256层螺旋CT对比剂不同注射部位选择对(并有)大型房间隔缺损的先天性心脏病图像质量影响的研究与应用[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(4): 68-74.

(收稿日期: 2022-04-14)

(校对编辑: 朱丹丹)

(上接第150页)

3年。部分患者在随访结束后可能出现新发骨质吸收区。因此，在更长的随访期发生骨质吸收还有待进一步研究。

综上所述，若骨骨质坏死区位于中外侧柱或内外侧柱，坏死范围大于30%，且增生反应区呈横行，则易发生骨质吸收，应密切随访。

参考文献

- [1] 赵素贞. 对比分析CT和核磁共振诊断股骨头坏死的临床作用[J]. 罕少疾病杂志, 2019, 26(3): 9-11.
- [2] Pijnenburg L, Felten R, Javier RM. A review of avascular necrosis of the hip and beyond[J]. Rev Med Interne, 2020, 41(1): 27-36.
- [3] Chen L, Hong G, Fang B, et al. Predicting the collapse of the femoral head due to osteonecrosis: From basic methods to application prospects[J]. J Orthop Translat, 2017, 11: 62-72.
- [4] Baba S, Motomura G, Ikemura S, et al. Quantitative evaluation of bone resorptive lesion volume in osteonecrosis of the femoral head using micro-computed tomography[J]. Joint Bone Spine, 2020, 87(1): 75-80.
- [5] Sugano N, Atsumi T, Ohzono K, et al. The 2001 revised criteria for diagnosis, classification, and staging of idiopathic osteonecrosis of the femoral head[J]. J Orthop Sci, 2002, 7(5): 601-605.
- [6] Liu GB, Li R, Lu Q, et al. Three-dimensional distribution of cystic lesions in osteonecrosis of the femoral head[J]. J Orthop Translat, 2019, 22: 109-115.
- [7] Zhao DW, Hu YC. Chinese experts' consensus on the diagnosis and treatment of osteonecrosis of the femoral head in adults[J]. Orthop Surg, 2012; 4: 125-130.
- [8] Yoon BH, Mont MA, Koo KH, et al. The 2019 Revised Version of Association Research Circulation Osseous Staging System of Osteonecrosis of the Femoral Head[J]. J Arthroplasty, 2020, 35(4): 933-940.
- [9] Gardeniers JWM. ARCO Committee on Terminology and Staging. Report on the committee meeting at Santiago de Compostella. ARCO News, 1993, 5: 79-82.
- [10] Wu W, He W, Wei QS, et al. Prognostic analysis of different morphology of

the necrotic-viable interface in osteonecrosis of the femoral head[J]. Int Orthop, 2018, 42(1): 133-139.

- [11] Gao F, Han J, He Z, et al. Radiological analysis of cystic lesion in osteonecrosis of the femoral head[J]. Int Orthop, 2018, 42(7): 1615-1621.
- [12] 方斌, 何伟, 展磊, 等. 不同坏死范围下股骨头坏死区应力分布的有限元分析[J]. 中医正骨, 2012, 24(10): 10-15.
- [13] Koo KH, Kim R, Cho SH, et al. Angiography, scintigraphy, intraosseous pressure, and histologic findings in high-risk osteonecrotic femoral heads with negative magnetic resonance images[J]. Clin Orthop Relat Res, 1994, (308): 127-138.
- [14] Ohzono K, Saito M, Sugano N, et al. The fate of nontraumatic avascular necrosis of the femoral head. A radiologic classification to formulate prognosis[J]. Clin Orthop Relat Res, 1992, (277): 73-78.
- [15] Chen L, Hong G, Fang B, et al. Predicting the collapse of the femoral head due to osteonecrosis: From basic methods to application prospects[J]. J Orthop Translat, 2017, 11: 62-72.
- [16] Arbab D, König DP. A traumatic Femoral Head Necrosis in Adults[J]. Dtsch Arztebl Int, 2016, 113(3): 31-38.
- [17] Petek D, Hannouche D, Suva D. Osteonecrosis of the femoral head: pathophysiology and current concepts of treatment[J]. EFORT Open Rev, 2019; 4(3): 85-97.
- [18] Seamon J, Keller T, Saleh J, et al. The pathogenesis of nontraumatic osteonecrosis[J]. Arthritis, 2012, 2012: 601763.
- [19] Samara S, Dailiana Z, Chassanidis C, et al. Expression profile of osteoprotegerin, RANK and RANKL genes in the femoral head of patients with avascular necrosis[J]. Exp Mol Pathol, 2014, 96(1): 9-14.
- [20] Gibon E, Lu LY, Nathan K, et al. Inflammation, ageing, and bone regeneration[J]. J Orthop Translat, 2017, 10: 28-35.
- [21] Lu C, Hansen E, Sapozhnikova A, et al. Effect of age on vascularization during fracture repair[J]. J Orthop Res, 2008, 26(10): 1384-1389.

(收稿日期: 2022-06-15)

(校对编辑: 朱丹丹)