

论 著  
(临床研究)

# 股骨头头颈开窗治疗股骨头坏死预后的临床-影像组学分析

席洪钟, 陈 浩, 宋 伟, 刘成林, 吴尧昆, 付佳豪, 孙光权, 杜 斌, 刘 铎

**[摘要]** **目的** 构建预测股骨头头颈开窗治疗股骨头坏死(ONFH)预后的临床-影像组学模型并探讨其预测价值。**方法** 回顾性分析 2010 年 6 月至 2021 年 6 月南京中医药大学附属医院行股骨头头颈开窗手术的 146 例(169 髋)ONFH 患者的临床资料,根据纳入和排除标准最终共纳入 106 例患者(121 髋)。按照随机抽样法(7:3)将其随机分为训练集(84 例)和验证集(37 例)。比较保髋成功和失败患者的临床以及影像资料,构建临床、影像组学以及临床-影像组学模型。以 ROC、决策曲线、校准曲线以及生存曲线评估模型的预测性能。**结果** 年龄、JIC 分型、术后免负重时间和术后持续接触危险因素是影响保髋结果的预测因素( $P<0.05$ )。与头颈开窗打压植骨治疗 ONFH 预后显著相关的 4 个影像组学特征,包括原始形状伸长率、小波 LLH 一阶偏度、小波 LHL glszm 大面积低灰度加重以及小波 HLL 一阶中值。与影像组学模型和临床模型相比,训练集以及验证集中的临床-影像组学模型都表现出了更优越的预测性能。决策曲线显示,在高风险阈值的最大范围内,训练集以及验证集中使用临床-影像组学模型比临床模型以及影像组学模型方案获得了更多临床收益。在训练集中,JIC 分型为 C2 型与最低的髋关节存活概率相关。此外,术后持续使用激素或酒精等风险因素也会显著降低髋关节存活概率。在训练集中,当 Rad-score 超过 1.4089 时,髋关节存活率明显降低。同样,对于年龄大于 39 岁、术后免负重时间少于 5 个月的患者,受累髋关节的存活率也相对较低。**结论** 临床-影像组学模型在预测股骨头头颈开窗打压植骨治疗 ONFH 的预后方面表现良好,可辅助临床医师判断保髋患者的预后。

**[关键词]** 股骨头坏死;预测模型;影像组学;股骨头头颈开窗**[中图分类号]** R445;R683**[文献标志码]** A**[文章编号]** 2097-2768(2025)01-0035-09**[DOI]** 10.16571/j.cnki.2097-2768.2025.01.006

## Clinical-imaging analysis of the prognosis of femoral head and neck fenestration as the treatment for osteonecrosis of the femoral head

XI Hongzhong, CHEN Hao, SONG Wei, LIU Chenglin, WU Yaokun, FU Jiahao, SUN Guangquan, DU Bin, LIU Xin  
(Department of Orthopedics, Affiliated Hospital of Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

**[Abstract]** **Objective** The study aims at developing a clinical-radiomic model for the prognosis of femoral head and neck fenestration as the treatment for osteonecrosis of the femoral head (ONFH), and exploring its predictive value. **Methods** The clinical data of 146 patients (169 hips) with ONFH who underwent femoral head and neck fenestration surgery in the Affiliated Hospital of Nanjing University of Chinese Medicine from June 2010 to June 2021 were retrospectively analyzed. According to the inclusion and exclusion criteria, a total of 106 patients (121 hips) were finally included. The patients were randomly divided into a training cohort (84 cases) and a validation cohort (37 cases) according to the random sampling method (7:3). Clinical and radiomic data of patients with successful and failed hip preservation were compared, and clinical, radiomic and clinical-radiomic models were established. The predictive performance of the models was assessed by ROC, decision curve, calibration curve, and survival curve. **Results** Age, JIC classification, postoperative non-weightbearing time, and continued postoperative exposure to risk factors were predictors of hip preservation outcomes ( $P<0.05$ ). Four radiomic features significantly associated with the prognosis of ONFH treated with femoral head and neck fenestration, including original shape elongation, wavelet-

**基金项目:**国家自然科学基金(82074471);江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX23\_0876)

**作者单位:**210029 南京,南京中医药大学附属医院骨科(席洪钟、陈 浩、宋 伟、刘成林、吴尧昆、付佳豪、孙光权、杜 斌、刘 铎)

**通信作者:**刘 铎, E-mail: liuxinsurg@163.com

LLH firstorder skewness, wavelet-LHL glszm large area low gray level emphasis, and wavelet-HLL firstorder median. Compared to the radiomic model and the clinical model in both the training cohort and the validation cohort, the clinical-radiomic model showed superior predictive performance. The decision curve showed that within the maximum range of the high-risk threshold, the use of clinical-radiomic model in the training cohort and in the validation cohort achieved more clinical benefits than the clinical model and the radiomic model. In the training cohort, JIC classification C2 was associated with the lowest probability of hip survival. In addition, risk factors such as continued use of glucocorticoids or alcohol after surgery can significantly reduce the probability of hip survival. In the training cohort, when the Rad-score exceeded 1.4089, the hip survival rate was significantly reduced. Similarly, for patients aged 39 years and above and with less than 5 months of weight-free time after surgery, the survival rate of the affected hip joint was also relatively low. **Conclusion** The clinical-radiomics model performs well in predicting the prognosis of femoral head and neck fenestration and impaction bone grafting for the treatment of ONFH, which can assist clinicians in judging the prognosis of patients undergoing hip preservation.

**[Key words]** osteonecrosis of the femoral head; prediction model; radiomics; bone grafting through windowing at femoral head-neck junction

## 0 引 言

股骨头坏死(osteonecrosis of the femoral head, ONFH),亦称股骨头缺血性坏死或股骨头无菌性坏死,是一种起病隐匿、进展迅速的功能毁灭性疾病<sup>[1]</sup>。一旦起病,患者会在短期内失去负重劳作能力,给家庭以及社会带来沉重的经济负担<sup>[2]</sup>。随着疾病进展到股骨头塌陷以及髋关节炎等 ONFH 疾病晚期阶段,全髋关节置换(total hip arthroplasty, THA)将成为唯一的治疗手段<sup>[3-4]</sup>。据统计,中国罹患 ONFH 的患者数量已累计 812 万,且常见于 30~50 周岁的中青年<sup>[5-6]</sup>。因此,在 ONFH 疾病的早期进行保髋手术以避免过早的 THA 具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。股骨头头颈开窗打压植骨作为一种经典的保髋术式,可以在直视下去除 ONFH 坏死骨、硬化骨以及纤维瘢痕组织,以达到充分减压、促进静脉回流的目的,最终促进股骨头的修复<sup>[9-11]</sup>。然而,许多因素会直接或间接降低保髋成功率,如术前存在骨髓水肿<sup>[12]</sup>、坏死面积过大<sup>[13-14]</sup>、股骨头外侧柱保存率低<sup>[15]</sup>以及术后继续接触危险因素等<sup>[16]</sup>。因此,在治疗前针对可能影响保髋疗效的危险因素进行预测,可以极大地帮助临床医师评估治疗效果,及时调整和改进治疗策略,从而有利于患者的预后。

计算机断层扫描(computed tomography, CT)是 ONFH 常用的放射诊断技术,可为临床医师提供有效的术前参考<sup>[1,17]</sup>。影像组学作为近年来迅速发展的一种研究模式,涉及医学影像特征的提取和量化,可以更全面地描述影像图像,提取肉眼难以识别的图像特征<sup>[18]</sup>。提取的影像组学特征常与人口统计学或临床检验指标相结合,以解决实际的临床问题,适当整合影像组学特征和临床因素可提高复杂临床决策的准确性<sup>[19-22]</sup>。已有许多研究将影像组学与疾病诊断和预测联系起来<sup>[23-26]</sup>,其中包括一些关于 ONFH 的研究<sup>[27-31]</sup>。然而,此类研究大多数重心偏

向影像组学,鲜有将影像组学与临床预测因素有效结合的实例。因此,本研究旨在开发和验证基于 CT 影像组学和临床因素的临床-影像组学模型,从而对股骨头头颈开窗打压植骨治疗 ONFH 患者进行个体化预后评估,并评价该模型的预测性能和临床应用可行性,以辅助临床外科医师的保髋决策。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 回顾性分析 2010 年 6 月至 2021 年 6 月南京中医药大学附属医院骨伤科接受股骨头头颈开窗打压植骨的 146 例(169 髋)ONFH 患者的临床资料。纳入标准:经影像学和(或)病理学证实的 ONFH;保髋术式是股骨头头颈开窗打压植骨并由同一外科医师实施;完整的 CT 图像和临床数据;超过 3 年的随访。排除标准:18 岁以下的患者;并有其他保髋术式的患者,如髓芯减压或腓骨棒移植;CT 图像质量不足以支撑放射学分析;缺乏有关患者人口统计学特征、实验室检查和随访临床资料。最终共纳入 106 例患者(121 髋)。按照随机抽样法(7:3)将其随机分为训练集(84 例)和验证集(37 例)。本研究经南京中医药大学附属医院伦理委员会批准(批准号:2023NL-001-01)

### 1.2 方法

**1.2.1 临床资料收集** 为收集患者相关临床信息,制定一份标准化数据表格。表格包括 16 个项目:患者的人口统计学和临床特征,包括年龄、性别、术侧、病因、BMI 和病程;实验室变量,包括中性粒细胞计数(N%)、碱性磷酸酶(ALP)、岩藻糖苷酶(AFU)和 D-二聚体;ONFH 特征,如 ARCO 分期、JIC 分型和术前髋关节 Harris 评分(HHS);治疗和随访详情,如手术期间是否进行了血管瓣移植、术后免负重时间、术后是否持续接触激素或酒精等危险因素,最终通过医院病历系统详细记录患者以上数据。

**1.2.2 随访** 所有纳入研究的患髋从术后 1 个月

开始进行随访,以 2021 年 6 月为随访终点,将所有纳入的 169 例患髌的结局以及时间长度记录并绘制生存曲线。保髌术后 1 个月所有患者行髌关节 X 线和 CT 扫描,之后分别于术后 3 个月、6 个月、以及每年复查髌关节正侧位 X 线,并根据病情进展选择进行 CT 以及 MRI 复查,并于每次随访之中记录患者疼痛以及活动情况。患者结束免负重期后,每次随访进行 Harris 评分。若患者因疼痛或者髌关节活动受限(HHS<70)而接受 THA,则视为保髌失败,即临床保髌失败。此外,若影像学评估出现髌关节严重塌陷(>2 mm),亦视为保髌失败,即影像学保髌失败。临床保髌失败或影像学保髌失败任意出现一种则判定为保髌失败,若双侧保髌的患者一侧髌关节的检查结果与另一侧不同,则根据各侧 CT 检查显示保髌后 3 年随访中股骨头塌陷是否超过 2 mm 进行分类。从保髌手术开始到失败的时间段被视为髌关节存活时间,所有保髌成功的患者默认髌关节存活时间为 36 个月。

**1.2.3 CT 检查、坏死区分割及特征提取** 所有 CT 扫描均在一台飞利浦 128 排 Brilliance CT 扫描仪上进行,相应的扫描标准参数设置如下:管电压 120~140 kV;管电流 220~680 mA;曝光时间 250~800 ms;切片厚度 1.0~3.0 mm;切片间隔 1.0~3.0 mm;重建矩阵,512×512。所有患者的术前髌部 CT 图像均来自本中心放射科的图像存档和通信系统。感兴趣区(region of interest, ROI)符合 ONFH CT 扫描征象的描述,即坏死骨和修复骨或软骨下骨折周围的骨硬化区<sup>[32]</sup>。所有 CT 图像均以 DICOM 格式导入开源 3D Slicer V5.0.2 (<https://www.slicer.org>) 软件,该软件可在术前 ONFH CT 图像中划定坏死区的水平、冠状和矢状位置,从而获得三维 ROI。经过滤波、log 化以及重采样预处理后以 1 mm×1 mm×1 mm 的体素大小和 1~64 的灰度值对所有 ROI 进行标准化处理。为降低人为误差,由 2 名具有 10 年以上工作经验的放射科医师选择手动模式在骨窗(窗宽 1500 Hu,窗位 400 Hu)下绘制目标病变的 ROI,如有意见分歧,则通过讨论达成共识。若无法达成一致,该 CT 图像将被排除在研究之外。然后由一位 ONFH 的资深骨科专家对 ROI 进行进一步校正,最终生成三维 ROI。分别于 CT 图像中的水平面、矢状面以及冠状面勾勒坏死区,然后组合三个层面合成 3D ROI。最后,使用 3D Slicer 软件扩展包 (<https://www.radiomics.io/pyradiomics.html>) 中的“PyRadiomics”插件提取影像组学特征,该插件可自动从每个 ROI 中提取 851 个特征,包括 18 个一阶统计特征、14 个形状特征、75

个纹理特征和 744 个小波特征。

**1.2.4 数据筛选及模型构建** 比较保髌成功与失败患者的临床资料,使用多因素 Logistic 回归模型比较差异具有统计学意义的临床结果,进一步分析影响股骨头头颈开窗打压植骨治疗 ONFH 预后的临床因素,构建临床模型。采用 LASSO 方法和 10 倍交叉验证来识别和选择与保髌结果显著相关的影像组学特征。根据 ROI 中的这些显著影像组学特征及其加权系数,计算 Rad-score,建立影像组学模型。联合临床影响因素及 Rad-score 建立临床-影像组学模型。

**1.3 统计学分析** 采用 SPSS 24.0、R 4.10 和 R Studio 2022.7.1.0 进行统计分析。正态分布计量资料使用均数±标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示,组间均值比较使用独立样本 *t* 检验。非正态分布计量资料以中位数(四分位数)表示,使用 Mann-Whitney U 检验比较两组差异。计数资料采用频数(%)表示,组间比较采用  $\chi^2$  检验。使用 Logistics 和 LASSO 回归分析风险因素, Cox 多因素风险回归模型进行生存分析。列线图、校准曲线以及决策曲线用以评估各模型的性能。以  $P\leq 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结 果

**2.1 随访结果** 生存曲线显示,当保髌生存时间为 36 个月时,后续患髌的生存概率趋于稳定。即保髌术后患者在 3 年内失败的风险较高,若 3 年内患者保髌成功,后续患者保髌大概率成功。见图 1。所以,本研究设置 3 年(36 个月)为随访时间结点。在 169 例患髌中,共有 106 例患者(121 髌)符合本研究的纳入和排除标准,其中 81 例患髌在随访中判定为保髌成功,保髌成功率达到 66.9%。

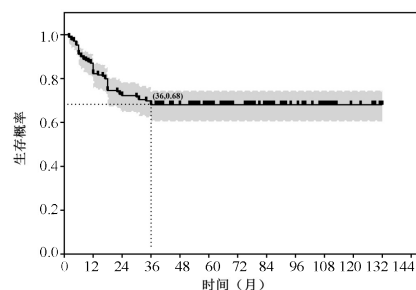


图 1 ONFH 患者的生存曲线

Figure 1 The survival curve of patients with ONFH

**2.2 基础资料** 121 患髌中,训练集中有 84 髌,验证集中有 37 髌。训练集中患者平均年龄为 35 岁,其中男 64 例。训练集中有 57 例患者在手术中进行了血管蒂移植,大多数患者被归类为 ARCO IIA 期



(65.5%), JIC 分型主要为 B 型 (39.3%) 和 C1 型 (45.2%)。激素相关股骨头坏死患者占 38.1%, 36.9% 的患者为病因不明的特发性 ONFH。训练集和验证集的保髋患者基线资料比较差异无统计学意义 ( $P>0.05$ ), 具有可比性。见表 1。训练集保髋成功率为 66.7%, 验证集为 67.7%。训练集 66.7% 的患者在超过 6 个月的时间里严格避免负重行走, 而验证集为 70.3%。训练集 60 髋的存活时间达到 36 个月, 其中 4 例被判定为保髋失败。验证集 28 髋存活时间达到了 36 个月, 其中 3 髋被归类为保髋失败。

表 1 ONFH 患者训练集和验证集的基础资料比较

Table 1 Comparison of clinical data between the training cohort and validation cohort of patients with ONFH

临床特征	训练集(n=84)		验证集(n=37)		P值
	成功	失败	成功	失败	
性别[n(%)]					0.322
男	44(68.8)	20(31.2)	18(72.0)	7(28.0)	
女	12(60.0)	8(40.0)	7(58.3)	5(41.7)	
患侧[n(%)]					0.295
左	26(57.8)	19(42.2)	12(75.0)	4(25.0)	
右	30(76.9)	9(23.1)	13(61.9)	8(38.1)	
病因[n(%)]					0.059
激素	22(68.8)	10(31.2)	13(68.4)	6(31.6)	
酒精	7(58.3)	5(41.7)	1(25.0)	3(75.0)	
创伤	6(66.7)	3(33.3)	5(83.3)	1(16.7)	
特发	21(67.7)	10(32.3)	6(75.0)	2(25.0)	
ARCO分期[n(%)]					0.463
ⅡA	40(72.7)	15(27.3)	17(65.4)	9(34.6)	
ⅡB	13(56.5)	10(43.5)	8(72.7)	3(27.3)	
Ⅲ	3(50.0)	3(50.0)	0(0.0)	0(0.0)	
J1分型[n(%)]					0.301
B	31(93.9)	2(6.1)	9(90.0)	1(10.0)	
C1	20(52.6)	18(47.4)	15(71.4)	6(28.6)	
C2	5(38.5)	8(61.5)	1(16.7)	5(83.3)	
术后接触风险因素[n(%)]					0.704
是	9(29.0)	22(81.0)	7(46.7)	8(53.3)	
否	47(88.7)	6(11.3)	18(81.8)	4(18.2)	
血管化[n(%)]					0.747
是	40(70.2)	17(29.8)	15(62.5)	9(37.5)	
否	16(59.3)	11(40.7)	10(76.9)	3(23.1)	
年龄( $\bar{x}\pm s$ , 岁)	35.21±8.66	47.07±5.88	37.72±6.13	51.00±5.82	0.123
术后免负重时间( $\bar{x}\pm s$ , d)	5.63±1.72	4.46±1.75	5.48±1.12	4.75±1.42	0.984
病程长短( $\bar{x}\pm s$ , d)	5.20±5.50	5.59±5.05	4.52±3.27	4.75±1.60	0.324
术前髋关节 Harris 评分( $\bar{x}\pm s$ )	68.27±10.31	66.75±10.88	68.88±9.98	66.92±13.79	0.820
BMI( $\bar{x}\pm s$ , kg/m <sup>2</sup> )	23.54±2.73	25.12±2.69	23.28±2.64	25.95±1.15	0.880
中性粒细胞百分比( $\bar{x}\pm s$ , %)	61.18±8.89	62.21±8.32	62.37±9.20	63.28±11.90	0.523
ALP( $\bar{x}\pm s$ , IU/L)	93.16±27.95	84.43±27.59	92.72±30.33	96.33±31.87	0.522
岩藻糖苷酶( $\bar{x}\pm s$ , U/L)	18.69±6.32	17.55±5.28	19.29±6.11	15.38±3.78	0.805
D-二聚体( $\bar{x}\pm s$ )	0.40±0.23	0.67±0.97	0.44±0.39	0.69±1.05	0.801

2.3 模型构建 根据单因素和多因素分析结果, 年龄、JIC 分型、术后免负重时间和术后持续接触危险因素是影响保髋结果的预测因素 ( $P<0.05$ )。见表 2。LASSO 以及 Logistic 回归分析筛选出与头颈开窗打压植骨治疗 ONFH 预后显著相关的 4 个影像组学特征, 包括原始形状伸长率、小波 LLH 一阶偏度、小波 LHL glszm 大面积低灰度加重以及小波 HLL 一阶

中值, 见图 2。

2.4 模型性能评估 保髋概率的校准图显示, 在训练集中, 列线图计算出的预测曲线与实际曲线之间重合度较高, 具有极好的一致性, 见图 3。通过比较表 3 以及图 4 中训练集中临床模型、影像组学模型以及临床-影像组学模型的 AUC 结果以及 ROC 曲线发现, 与影像组学模型和临床模型相比, 训练集以及验证集中的临床-影像组学模型都表现出了更优越的预测性能。决策曲线显示, 在高风险阈值的最大范围内, 训练集以及验证集中使用临床-影像组学模型比临床模型以及影像组学模型方案获得了更多临床收益, 见图 5。

2.5 Kaplan-Meier 生存分析 临床-影像组学模型中的每个预测因素对髋关节存活率都有显著影响 ( $P<0.0001$ )。在训练集中, JIC 分期为 C2 型与最低的髋关节存活概率相关。此外, 术后持续使用激素或酒精等风险因素也会显著降低髋关节存活概率。在训练集中, 当 Rad-score 超过 1.4089 时, 髋关节存活率明显降低。同样, 对于年龄大于 39 岁、术后免负重时间少于 5 个月的患者, 受累髋关节的存活率也相对较低。见图 6。

表 2 ONFH 患者训练集中临床数据的单因素和多因素分析

Table 2 Univariate and multivariate analysis of clinical data in the training cohort of patients with ONFH

临床特征	单因素分析			多因素分析		
	HR	95%CI	P值	HR	95%CI	P值
性别	1.467	0.519~4.146	0.470			
患侧	0.411	0.159~1.063	0.067			
病因	0.984	0.642~1.509	0.942			
ARCO 分期	1.786	0.872~3.657	0.113			
JIC 分型	4.835	2.129~10.983	<0.001	7.281	1.831~28.929	0.005
术后继续接触风险因素	0.052	0.017~0.165	<0.000	0.138	0.026~0.725	0.019
血管化	1.618	0.623~4.202	0.323			
年龄	1.237	1.122~1.364	<0.000	1.254	1.078~1.459	0.003
术后免负重时间	0.679	0.513~0.900	0.007	0.588	0.355~0.975	0.040
病程长短	1.014	0.932~1.102	0.751			
髋关节 Harris 评分	0.986	0.944~1.030	0.529			
BMI	1.255	1.038~1.518	0.019	1.347	0.947~1.917	0.097
中性粒细胞百分比	1.014	0.961~1.070	0.605			
碱性磷酸酶	0.988	0.971~1.006	0.180			
岩藻糖苷酶	0.967	0.893~1.047	0.410			
D-二聚体	2.455	0.770~7.834	0.129			

表 3 训练集和验证集中的三种模型的性能评估

Table 3 The performance evaluation of three models in the training cohort and validation cohort

模型	训练集(n=84)			验证集(n=37)		
	敏感度	特异度	AUC(95%CI)	敏感度	特异度	AUC(95%CI)
临床-影像组学模型	0.964	0.893	0.976(0.950~1.000)	0.920	0.917	0.977(0.937~1.000)
临床模型	0.911	0.857	0.952(0.912~0.991)	0.833	0.960	0.953(0.891~1.000)
影像组学模型	0.893	0.714	0.853(0.761~0.946)	0.750	0.760	0.783(0.625~0.941)

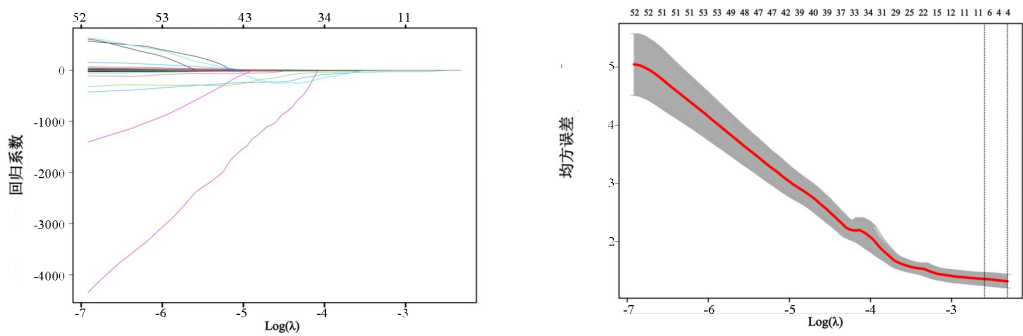


图 2 ONFH 患者影像组学特征 LASSO 筛选图  
Figure 2 LASSO screening chart of radiomic features of patients with ONFH

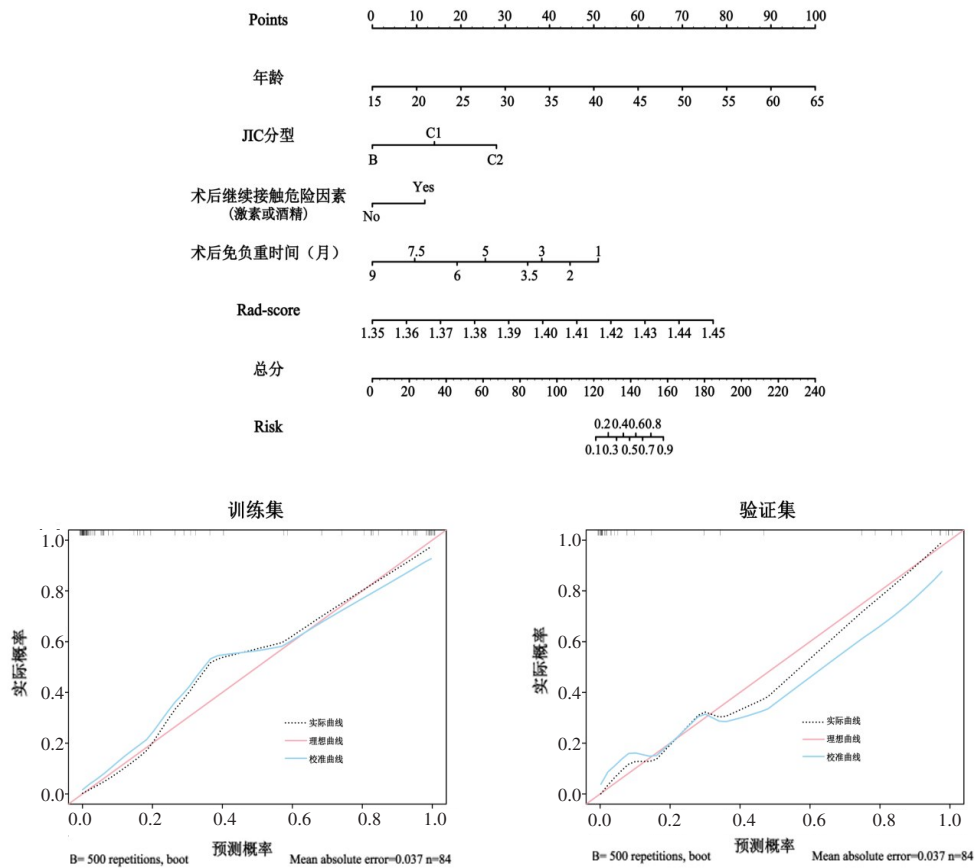


图 3 ONFH 患者列线图及训练集、验证集的校准曲线  
Figure 3 Nomogram and calibration curves for training cohort and validation cohort of patients with ONFH

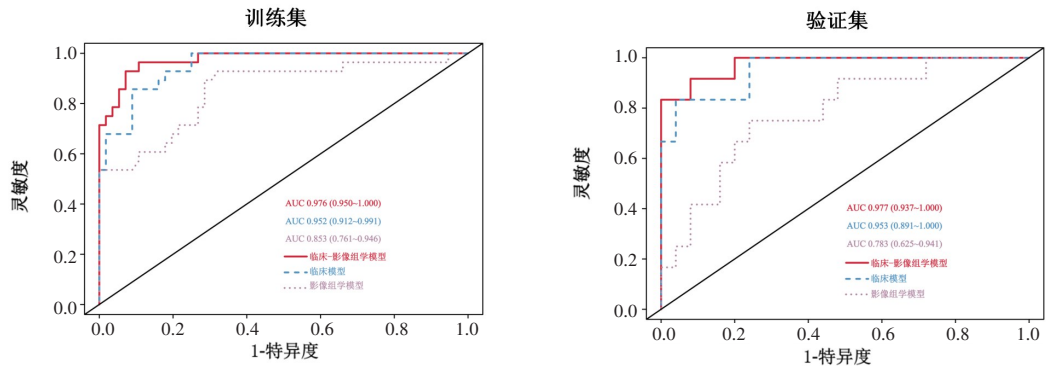


图 4 ONFH 患者训练集和验证集中三个模型的 ROC 曲线  
Figure 4 The ROC curves for the three models in the training and validation cohorts of patients with ONFH

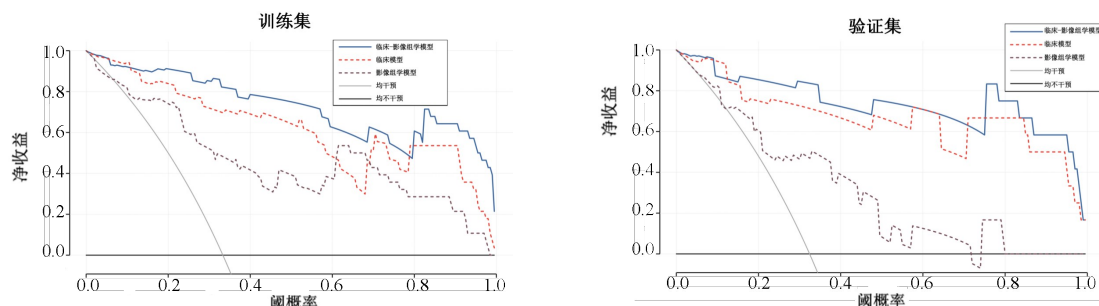


图 5 ONFH 患者训练集和验证集的 DCA 决策曲线

Figure 5 DCA decision curves for training and validation cohorts of patients with ONFH

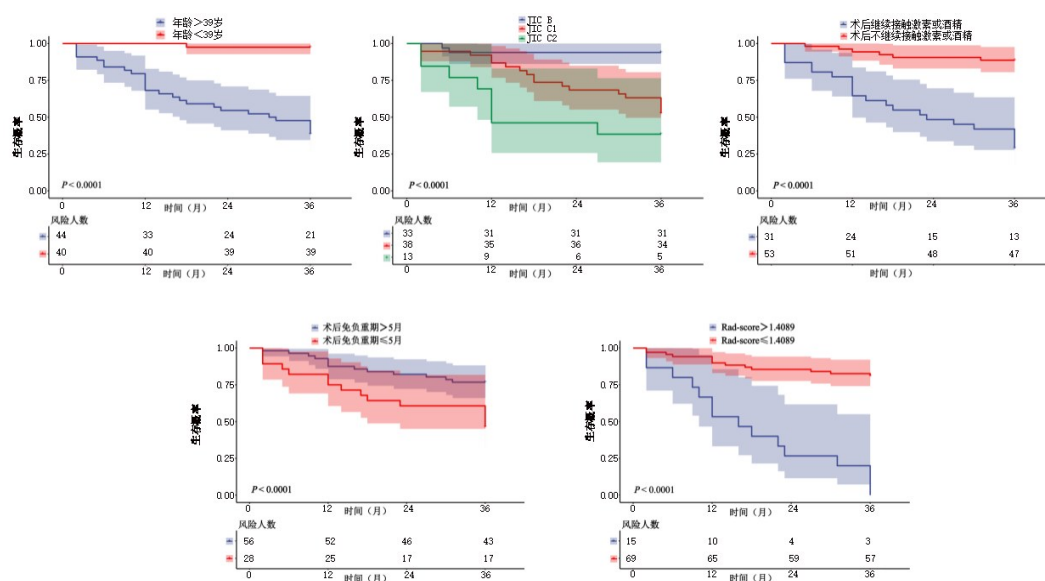


图 6 ONFH 患者临床-影像组学模型中每个预测因素对髋关节生存概率的影响

Figure 6 The impact of each predictive factor in the clinical-radiomic model on the hip joint survival rate of patients with ONFH

### 3 讨 论

预测 ONFH 的预后对临床治疗和策略极为重要。因此,本研究对 121 例髋关节的回顾性数据,开发并验证了一个基于临床资料和 CT 影像资料的临床-影像组学模型,用于预测接受股骨头颈开窗打压植骨的 ONFH 患者的保髋预后。本研究证实,结合影像组学特征和临床预测因素的临床-影像组学模型在预后预测方面优于单纯的临床模型和影像组学模型。此外,本研究还根据临床-影像组学模型中的预测因素生成了列线图,以可视化预测保髋术后的疗效。借助该列线图,临床医师可以根据术前情况辅助选择更适合该类保髋术式的 ONFH 患者。此外,列线图中的术后持续接触危险因素和免负重时间预测因素还可用于指导保髋患者的术后康复。

本研究中的临床-影像组学模型综合了最有可能影响保髋手术预后的四个临床因素以及影像组学特征:年龄、JIC 分型、术后持续接触危险因素、术后免负重时间以及 Rad-score。生存曲线也证实了这五个预测因素对髋关节存活率的重要影响。首先,本研究结果表明年龄越大,保髋失败的可能性越高。这可能是由于随着年龄的增长,骨代谢失衡加剧,破骨细胞的活性逐渐超过成骨细胞的活性造成的<sup>[33-34]</sup>。骨代谢失衡会导致骨强度下降,骨脆性增加,从而导致术后骨修复相对缓慢甚至失败。此外,也有研究表明,年龄与骨小梁的组成和微环境有显著的相关性,尤其与股骨头关系显著<sup>[35]</sup>。这可能是股骨头的解剖负荷环境决定的,多年的进行性负重会对骨小梁造成累积性损伤,最终影响骨修复。

第二个与保髋结果密切相关的临床预后因素



是 JIC 分型。JIC 分型根据坏死病灶的位置对 ONFH 进行分类<sup>[36-37]</sup>。在 A 期,病变占负重部分内侧的三分之一或更少;在 B 期,病变占负重部分内侧的三分之二或更少。而在 C 阶段,病变占负重部分的内侧三分之二以上。C 阶段有两个子类别:C1 阶段病变不向外侧延伸,而 C2 阶段病变向外侧延伸至髁臼边缘。因此,JIC 分型可以在一定程度上揭示 ONFH 病变的解剖位置。临床研究表明,坏死集中在 JIC C2 型的患者预后往往较差<sup>[38-39]</sup>,这与我们的研究结果保持一致。JIC 分型在预测股骨头坏死的预后方面起着重要作用,这可能是因为它反映了坏死区的范围和外侧柱受累的程度。前外侧柱的完整性对维持股骨头的功能起着重要作用,这可能是本研究中 C2 分型患者术后股骨头存活概率低于 B 型和 C1 型患者的主要原因。因此,对于坏死区主要位于股骨头中柱和内柱,而外侧柱较为完整的患者,保髋治疗将更为有利。

与保髋预后相关的第三个具有临床意义的预测因素是术后持续接触导致髋关节功能障碍的危险因素。值得注意的是,在所有临床 ONFH 的病因中,GA-ONFH 是最常见的类型<sup>[40-41]</sup>。有临床研究指出,对于系统性红斑狼疮患者,糖皮质激素剂量每增加 10 mg/d,ONFH 的风险就会增加 3.6%<sup>[42]</sup>。同样,在临床实践中,也观察到因急性呼吸窘迫而接受糖皮质激素治疗的患者在随访期间发生和进展成 ONFH<sup>[43]</sup>。饮酒也是导致 ONFH 的一个重要因素。一项流行病学研究表明,酒精是导致股骨头坏死最常见的病因之一,约有 20%~45% 的 ONFH 患者存在不同程度的饮酒史<sup>[44-45]</sup>。此外,有酗酒史的人群股骨头坏死发病率大概为 5.3%<sup>[46]</sup>。大量研究证实,糖皮质激素和酒精可导致股骨头微循环障碍,从而影响股骨头的血液供应,导致骨坏死的发生<sup>[47-51]</sup>。此外,激素和酒精会导致成骨能力下降、骨小梁稀疏和骨密度降低,最终影响保髋术后的骨修复和重建过程<sup>[52-54]</sup>。

最后,为了给保髋患者的骨修复提供一个相对稳定的环境,患者必须在术后一段时间内避免负重行走。负重作为缺血的加重因素之一,会导致 ONFH 的进展<sup>[55-57]</sup>。保髋术后股骨头的修复通常需要 3~6 个月的时间,过早的负重会对股骨头造成过大的压力,导致骨修复失败。骨科医师通常建议患者至少需要 3 个月的绝对免负重期,6 个月的相对免负重期,以便为骨小梁的爬行、置换和新生血管的形成提供一定的条件。

在本研究中,Rad-score 也是影响保髋术后预后的一个重要因素,这主要是因为它来自于术前髋关节 CT 图像中提取的 851 个影像组学特征。CT 影像已被证实能清晰显示 ONFH 患者骨性结构的动态演变和塌陷风险<sup>[58-60]</sup>,因此本研究将 CT 影像组学应用于保髋手术预后的预测。在对 ROI 进行特征提取、降维和验证后,筛选出了与保髋预后显著相关的四个影像组学特征。本研究构建的临床-影像组学模型优于单纯的临床模型和放射组学模型,这可能是由于其综合了影像组学特征所表现出的坏死区特征,并将坏死区的宏观和微观特征与临床特征相结合。影像组学可以将图像转化为数据,从而量化坏死区域的特征。虽然临床模型的预测性能已经很高,但非典型的坏死特征在临床实践中难以识别,因此结合影像组学和临床特征的临床-影像组学模型具有更高的预测性能。临床-影像组学模型能从整体和局部全面揭示影响保髋预后的因素,因为它结合了影像组学的微观特征和临床实践的宏观认识。因此,临床-影像组学模型大大提高了预测性能,从而实现了早期识别保髋疗效高的患者。

综上所述,本研究基于 CT 影像组学以及临床资料建立并验证了一个临床-影像组学模型,用于预测股骨头头颈开窗打压植骨治疗 ONFH 患者的治疗反应。该模型具有极佳的预测性能,可作为临床实践中的有力工具,为 ONFH 患者制定个性化临床诊断和治疗策略提供客观、量化的指导。然而本研究也存在不足之处,样本量不足,后续将进一步扩大样本量,以获得更全面的预测模型;本研究为回顾性研究,不涉及前瞻性数据分析。在未来的临床实践中,可根据该临床-影像组学模型进行前瞻性试验,以进一步验证其有效性。

## 【参考文献】

- [1] 孙 伟,高福强,李子荣. 股骨头坏死临床诊疗技术专家共识 (2022 年)[J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36(11):1319-1326.
- [2] Yuan P, Liu X, Du B, *et al.* Mid- To Long-Term Results of Modified Avascular Fibular Grafting for Onfh[J]. J Hip Preserv Surg, 2021, 8(3):274-281.
- [3] Migliorini F, Maffulli N, Baroncini A, *et al.* Failure and Progression to Total Hip Arthroplasty Among the Treatments for Femoral Head Osteonecrosis: A Bayesian Network Meta-Analysis[J]. Br Med Bull, 2021, 138(1):112-125.
- [4] 李子荣. 股骨头坏死临床诊疗规范[J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24(1):49-54.
- [5] Tan B, Li W, Zeng P, *et al.* Epidemiological Study Based On Chi-

- na Osteonecrosis of the Femoral Head Database [J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(1):153-160.
- [6] Lyu J, Ma T, Huang X, *et al.* Core Decompression with B-Tri-Calcium Phosphate Grafts in Combination with Platelet-Rich Plasma for the Treatment of Avascular Necrosis of Femoral Head [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1):40.
- [7] Du D, Hsu P, Zhu Z, *et al.* Current Surgical Options and Innovation for Repairing Articular Cartilage Defects in the Femoral Head [J]. *J Orthop Translat*, 2020, 21:122-128.
- [8] 何伟. 如何把握股骨头坏死患者的保髋治疗时机 [J]. *中国骨与关节杂志*, 2016, 5(2):82-86.
- [9] Mont MA, Salem HS, Piuze NS, *et al.* Nontraumatic Osteonecrosis of the Femoral Head: Where Do we Stand Today?: A 5-Year Update [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2020, 102(12):1084-1099.
- [10] Li D, Xie X, Kang P, *et al.* Percutaneously Drilling through Femoral Head and Neck Fenestration Combining with Compacted Autograft for Early Femoral Head Necrosis: A Retrospective Study [J]. *J Orthop Sci*, 2017, 22(6):1060-1065.
- [11] 白哲, 王博强, 郭威, 等. 头颈开窗打压植骨术与髓芯减压打压植骨术治疗早中期股骨头坏死的临床效果比较 [J]. *中国临床医生杂志*, 2021, 49(2):208-210.
- [12] Ito H, Matsuno T, Minami A. Relationship Between Bone Marrow Edema and Development of Symptoms in Patients with Osteonecrosis of the Femoral Head [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2006, 186(6):1761-1770.
- [13] Hoogervorst P, Campbell JC, Scholz N, *et al.* Core Decompression and Bone Marrow Aspiration Concentrate Grafting for Osteonecrosis of the Femoral Head [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2022, 104(Suppl 2):54-60.
- [14] 袁强, 董一平, 张颖, 等. 富血小板血浆联合股骨头坏死愈胶囊治疗不同面积股骨头坏死的疗效比较 [J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2023, 31(3):31-37.
- [15] Moya-Angeler J, Gianakos AL, Villa JC, *et al.* Current Concepts On Osteonecrosis of the Femoral Head [J]. *World J Orthop*, 2015, 6(8):590-601.
- [16] Powell C, Chang C, Naguwa SM, *et al.* Steroid Induced Osteonecrosis: An Analysis of Steroid Dosing Risk [J]. *Autoimmun Rev*, 2010, 9(11):721-743.
- [17] Kim J, Lee SK, Kim JY, *et al.* Ct and Mri Findings Beyond the Subchondral Bone in Osteonecrosis of the Femoral Head to Distinguish Between Arco Stages 2 and 3a [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(7):4789-4800.
- [18] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, *et al.* Introduction to Radiomics [J]. *J Nucl Med*, 2020, 61(4):488-495.
- [19] Yip SS, Aerts HJ. Applications and Limitations of Radiomics [J]. *Phys Med Biol*, 2016, 61(13):R150-R166.
- [20] Rizzo S, Botta F, Raimondi S, *et al.* Radiomics: The Facts and the Challenges of Image Analysis [J]. *Eur Radiol Exp*, 2018, 2(1):36.
- [21] Zhang X, Zhang Y, Zhang G, *et al.* Deep Learning with Radiomics for Disease Diagnosis and Treatment: Challenges and Potential [J]. *Front Oncol*, 2022, 12:773840.
- [22] 杨钱, 王海宝. 基于术前 Mri 影像学及临床特征的卵巢癌淋巴结转移预测模型构建及验证 [J]. *医学研究与战创伤救治*, 2024, 37(1):63-68.
- [23] Yu Y, He Z, Ouyang J, *et al.* Magnetic Resonance Imaging Radiomics Predicts Preoperative Axillary Lymph Node Metastasis to Support Surgical Decisions and is Associated with Tumor Microenvironment in Invasive Breast Cancer: A Machine Learning, Multicenter Study [J]. *EBioMedicine*, 2021, 69:103460.
- [24] Huang EP, O'Connor J, McShane LM, *et al.* Criteria for the Translation of Radiomics Into Clinically Useful Tests [J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2023, 20(2):69-82.
- [25] 杨晓楠, 王得志, 王成健, 等. 多参数 Mri 影像组学与深度学习模型鉴别良、恶性黏液样软组织肿瘤 [J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40(7):1078-1082.
- [26] 杨震, 杨明, 戚荣丰. 骨肿瘤影像组学研究进展 [J]. *医学研究与战创伤救治*, 2024, 37(5):538-542.
- [27] Liu X, Chen H, Xue P, *et al.* Visual and Quantitative Assessment of the Effectiveness of Non-Vascularized Bone Grafting in Osteonecrosis of the Femoral Head Via Ct-Based Radiomics and Clinical Data [J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2023, 37(7):846-855.
- [28] Hernigou P, Verrier S, Homma Y, *et al.* Prognosis of Hip Osteonecrosis After Cell Therapy with a Calculator and Artificial Intelligence: Ten Year Collapse-Free Survival Prediction On Three Thousand and Twenty One Hips [J]. *Int Orthop*, 2023, 47(7):1689-1705.
- [29] 刘铨, 陈浩, 薛鹏, 等. 基于 CT 影像组学和临床资料可视量化评估非血管化植骨的保髋疗效 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2023, 37(7):846-855.
- [30] Zhu L, Han J, Guo R, *et al.* An Automatic Classification of the Early Osteonecrosis of Femoral Head with Deep Learning [J]. *Curr Med Imaging*, 2020, 16(10):1323-1331.
- [31] Chee CG, Kim Y, Kang Y, *et al.* Performance of a Deep Learning Algorithm in Detecting Osteonecrosis of the Femoral Head On Digital Radiography: A Comparison with Assessments by Radiologists [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2019, 213(1):155-162.
- [32] Zhao D, Zhang F, Wang B, *et al.* Guidelines for Clinical Diagnosis and Treatment of Osteonecrosis of the Femoral Head in Adults (2019 Version) [J]. *J Orthop Translat*, 2020, 21:100-110.
- [33] Seeman E. Age- And Menopause-Related Bone Loss Compromise Cortical and Trabecular Microstructure [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2013, 68(10):1218-1225.
- [34] 司誉豪, 马勇, 尹恒. 去分泌血清制备方法筛选及对成骨细胞与破骨细胞生物活性的影响 [J]. *医学研究与战创伤救治*, 2023, 36(5):449-455.
- [35] Turunen MJ, Prantner V, Jurvelin JS, *et al.* Composition and Microarchitecture of Human Trabecular Bone Change with Age and Differ Between Anatomical Locations [J]. *Bone*, 2013, 54(1):118-125.



- [36] 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.
- [37] 陈浩, 杜斌, 陈阳, 等. 头颈开窗打压植骨联合缝匠肌骨瓣移植术治疗 Arco II 期股骨头坏死的疗效分析[J]. *医学研究生学报*, 2021, 34(12):1267-1272.
- [38] Kuroda Y, Tanaka T, Miyagawa T, *et al.* Classification of Osteonecrosis of the Femoral Head: Who Should Have Surgery? [J]. *Bone Joint Res*, 2019, 8(10):451-458.
- [39] 黄艺轩, 郭铭滨, 麦健斌, 等. 同种异体腓骨植骨术后股骨头早期塌陷进展的影响因素及其预测价值[J]. *解放军医学杂志*, 2024, 49(11):1272-1280.
- [40] Fukushima W, Fujioka M, Kubo T, *et al.* Nationwide Epidemiologic Survey of Idiopathic Osteonecrosis of the Femoral Head [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468(10):2715-2724.
- [41] 李时斌, 赖渝, 周毅, 等. 激素性股骨头坏死发病机制及相关信号通路的靶点效应[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(6):935-941.
- [42] Mont MA, Pivec R, Banerjee S, *et al.* High-Dose Corticosteroid Use and Risk of Hip Osteonecrosis: Meta-Analysis and Systematic Literature Review [J]. *J Arthroplasty*, 2015, 30(9):1506-1512.
- [43] Zhao FC, Guo KJ, Li ZR. Osteonecrosis of the Femoral Head in SARS Patients: Seven Years Later[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2013, 23(6):671-677.
- [44] Guggenbuhl P, Robin F, Cadiou S, *et al.* Etiology of Avascular Osteonecrosis of the Femoral Head[J]. *Morphologie*, 2021, 105(349):80-84.
- [45] Tsai SW, Wu PK, Chen CF, *et al.* Etiologies and Outcome of Osteonecrosis of the Femoral Head: Etiology and Outcome Study in a Taiwan Population[J]. *J Chin Med Assoc*, 2016, 79(1):39-45.
- [46] Orlić D, Jovanović S, Anticević D, *et al.* Frequency of Idiopathic Aseptic Necrosis in Medically Treated Alcoholics [J]. *Int Orthop*, 1990, 14(4):383-386.
- [47] Chang C, Greenspan A, Gershwin ME. The Pathogenesis, Diagnosis and Clinical Manifestations of Steroid-Induced Osteonecrosis[J]. *J Autoimmun*, 2020, 110:102460.
- [48] Konarski W, Poboży T, Konarska K, *et al.* Osteonecrosis Related to Steroid and Alcohol Use-an Update On Pathogenesis [J]. *Healthcare (Basel)*, 2023, 11(13):1846.
- [49] Zhou T, Ma S, Zhao Y, *et al.* Identification and Characterization of Extrachromosomal Circular Dna in Alcohol Induced Osteonecrosis of Femoral Head[J]. *Front Genet*, 2022, 13:918379.
- [50] 张杰, 曹建泽, 刘永飞, 等. 激素性股骨头坏死发病机制的研究进展[J]. *中国矫形外科杂志*, 2024, 32(7):620-624.
- [51] 沈莹姗, 何敏聪, 庄至坤, 等. 激素性股骨头坏死和酒精性股骨头坏死的病理学差异及其分子机制研究[J]. *中医正骨*, 2023, 35(5):1-7.
- [52] Lane NE. Glucocorticoid-Induced Osteoporosis: New Insights Into the Pathophysiology and Treatments [J]. *Curr Osteoporos Rep*, 2019, 17(1):1-7.
- [53] Chen Y, Zhong Z, Chen W, *et al.* Glucocorticoid-Induced Dose-Related and Site-Specific Bone Remodelling, Microstructure, and Mechanical Changes in Cancellous and Cortical Bones [J]. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 2021, 48(10):1421-1429.
- [54] Chen X, Li M, Yan J, *et al.* Alcohol Induces Cellular Senescence and Impairs Osteogenic Potential in Bone Marrow-Derived Mesenchymal Stem Cells [J]. *Alcohol Alcohol*, 2017, 52(3):289-297.
- [55] Mihara K, Hirano T. Standing is a Causative Factor in Osteonecrosis of the Femoral Head in Growing Rats [J]. *J Pediatr Orthop*, 1998, 18(5):665-669.
- [56] Floerkemeier T, Lutz A, Nackenhorst U, *et al.* Core Decompression and Osteonecrosis Intervention Rod in Osteonecrosis of the Femoral Head: Clinical Outcome and Finite Element Analysis [J]. *Int Orthop*, 2011, 35(10):1461-1466.
- [57] Kim HK, Aruwajoye O, Stetler J, *et al.* Effects of Non-Weight-Bearing On the Immature Femoral Head Following Ischemic Osteonecrosis: An Experimental Investigation in Immature Pigs [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2012, 94(24):2228-2237.
- [58] Huang Z, Tan B, Ye H, *et al.* Dynamic Evolution of Osseous Structure in Osteonecrosis of the Femoral Head and Dynamic Collapse Risks: A Preliminary Ct Image Study [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1):539.
- [59] 杨光辉, 李小荣, 易进, 等. 早期股骨头坏死患者 CT 征象和相关参数对股骨头塌陷风险的预测价值及与预后的关系 [J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2024, 22(5):164-167.
- [60] 刘艳艳. CT 与磁共振诊断股骨头坏死的临床价值分析[J]. *影像研究与医学应用*, 2024, 8(7):164-166.

(收稿日期:2024-07-06; 修回日期:2024-09-25)

(责任编辑:杨建鑫; 英文编辑:龙宝仪)