

股骨头坏死塌陷预测方法的研究进展

田志敏^{1,2}, 何淳诺¹, 吴昊越¹, 李焕奎¹, 张浩强^{1*}

¹解放军联勤保障部队第940医院关节外科, 甘肃兰州 730000; ²甘肃中医药大学第一临床医学院, 甘肃兰州 730000

[中图分类号] R681.8; R445.2; R814.4 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.0119.2024.0813

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 田志敏, 何淳诺, 吴昊越, 等. 股骨头坏死塌陷预测方法的研究进展[J]. 解放军医学杂志, 2026, 51(3): 453-460.

[收稿日期] 2024-01-26 [录用日期] 2024-04-24 [上线日期] 2024-08-13

[摘要] 股骨头坏死(ONFH)的治疗因股骨头是否塌陷而截然不同。早期ONFH进展为塌陷与坏死病灶的性质和物理参数相关, 在病变早期准确评估坏死病灶的预后对选择临床治疗方案具有重要意义。目前, ONFH的塌陷预测主要依赖X线片和MRI图像, 通过评估坏死病灶在股骨头中的位置、面积、体积及角度等指标来预测塌陷的风险。研究表明, 坏死病灶位于股骨头的前部或外侧, 占股骨头面积或体积的比例较高, 或占据整个股骨头特别是负重区域的角度较大时, 塌陷的风险均会增加。塌陷进展是多种因素共同作用的结果, 以往的预测方法仅考虑了单一因素对塌陷进展的影响, 导致其预测价值受限。为提高塌陷预测的准确性, 必须综合各种风险因素对塌陷进展的影响。本文综述不同的ONFH塌陷预测方法的特点和预测价值, 旨在为临床预测ONFH患者的塌陷风险和预后提供可靠的依据。

[关键词] 股骨头坏死; 塌陷; 预测

Research advances in methods for predicting femoral head necrosis collapse

Tian Zhi-Min^{1,2}, He Chun-Nuo¹, Wu Hao-Yue¹, Li Huan-Xi¹, Zhang Hao-Qiang^{1*}

¹Department of Joint Surgery, the 940th Hospital of PLA Joint Logistics Support Force, Lanzhou, Gansu 730000, China

²The First School of Clinical Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730000, China

*Corresponding author, E-mail: zhanghaoqiang_fmumu@163.com

This work was supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province (22JRSRA009), the Innovation Project of Young Scientific and Technological Talents in Lanzhou (2023-2-28), and the Research Project in the 940th Hospital of Joint Logistic Support Force of Chinese PLA (2023YXKY014)

[Abstract] The treatment of osteonecrosis of the femoral head (ONFH) is distinctly different depending on whether the femoral head collapses or not. The progression of early ONFH to collapse correlates with the nature and physical parameters of the necrotic focus. Therefore, accurate assessment of the prognosis of necrotic foci in the early stages of the focus is important for the selection of clinical treatment options. Currently, the prediction of collapse in ONFH mainly relies on radiographs and MRI images, and the risk of collapse is predicted by calculating the location, area, volume, and angle of the necrotic focus in the femoral head. Numerous studies have shown that the risk of collapse is higher when the necrotic focus is located in the anterior or lateral part of the femoral head, accounts for a larger proportion of the femoral head's area or volume, occupies the entire femoral head, especially the weight-bearing region, at a larger angle. However, collapse progression is the result of a combination of factors, and past prediction methods only considered the influence of a single factor on collapse progression, resulting in their limited predictive value. To improve the accuracy of collapse prediction, it is necessary to synthesize the effects of various risk factors on collapse progression. By reviewing the characteristics and predictive value of different ONFH collapse prediction methods, this article aims to provide a more reliable basis for clinical prediction of collapse risk and prognosis in patients with ONFH.

[Key words] osteonecrosis, femoral head; collapse; prediction

[基金项目] 甘肃省自然科学基金(22JRSRA009); 兰州市青年科技人才创新项目(2023-2-28); 解放军联勤保障部队第940医院内科研计划项目(2023YXKY014)

[作者简介] 田志敏, 硕士研究生, 主要从事股骨头坏死和骨关节退行性疾病的基础与临床研究

[通信作者] 张浩强, E-mail: zhanghaoqiang_fmumu@163.com

股骨头坏死 (osteonecrosis of the femoral head, ONFH) 是由于股骨头内血液供应不足导致的骨组织坏死, 进而局部结构发生改变甚至塌陷, 最终引起髋关节疼痛和功能障碍^[1-3]。此病多见于 30~50 岁活动量大的中青年, 目前尚无有效的治疗方法阻止其进展^[4-5]。70%~80% 的患者在短期内进展为股骨头塌陷, 最终须行人工全髋关节置换^[5-6]。因此, 防治塌陷是治疗 ONFH 的关键环节。基于此, 国内外学者希望在疾病早期准确预测塌陷风险, 并制定相应措施预防塌陷。既往研究表明, ONFH 塌陷进展受多种因素共同影响, 其中以坏死病灶部位和大小起主要作用, 并且塌陷预测数据获取途径以影像学图像和有限元分析为主^[7]。现有的预测方法均展现出较好的预测性能, 但多数研究仅从某单一角度考虑塌陷进展, 少有研究在多个层面联合评估塌陷的风险。

此外, 由于研究方法的不同, 现有研究结果之间存在较大差异, 目前尚缺乏统一且科学有效的 ONFH 塌陷预测方法。本文对 ONFH 塌陷的预测方法进行综述, 总结不同方法的特点, 进而为建立一种更可靠、精准的塌陷预测方法提供理论需求和研究方向, 最终为临床治疗提供参考依据。

1 基于X线片预测

X线摄片是 ONFH 诊疗过程中最基础、最常规的检查, 可初步评估坏死病灶的位置、大小和形态。既往研究显示, X线片上出现“新月征”是软骨下骨折的标志, 意味着坏死病灶可能进展为塌陷^[2,8]。依据坏死病灶在X线片上的表现, 许多学者通过评估病灶位置、测量病灶累及弧度、计算坏死面积或股骨头保留角等方法预测塌陷的风险(表1)。

表1 基于X线片的股骨头塌陷主要预测方法

Tab.1 Main prediction methods based on X-ray film for prediction of femoral head collapses

预测方法	预测依据	临界值及相应风险
Kerboul 弧度和法	确定股骨头中心, 测量髋关节正位及蛙位X线片上的坏死弧度 α 与 β , 计算弧度和 $(\alpha+\beta)$ 进行预测	$(\alpha+\beta)\geq 200^\circ$ 时塌陷率为100%, $160^\circ\sim 200^\circ$ 时塌陷率为39%, $<160^\circ$ 时塌陷率为0%
Sugano 坏死面积百分比法	在髋关节正、侧位X线片上分别测量坏死区域与整个股骨头的面积并计算其比值进行预测, 坏死区面积百分比(%)=坏死区域面积/股骨头总面积 $\times 100\%$	正位X线片上坏死面积超过负重区内侧1/3, 侧位X线片上坏死面积百分比 $>43\%$ 时大面积塌陷率为100%; 正位X线片上坏死区域未超过负重区内侧1/3, 侧位X线片上坏死面积百分比 $<43\%$ 时大面积塌陷率为0%
Utsunomiya 坏死边界法	在侧位X线片上根据坏死灶占髋臼负重部分的前界位置预测: I型占髋臼内侧区 $\leq 1/3$; II型占髋臼内侧区 $>1/3$ 且 $\leq 2/3$; III型占髋臼内侧区 $>2/3$	-
保留角法	在髋关节正位、蛙位X线片上确定股骨头中心点O, 将股骨头前、外侧头颈交界处标为A点, 股骨头硬化带前、外侧边缘标为B点, 连接OA、OB, 这两条线所形成的夹角称为股骨头前、外侧壁的保留角, 通过计算股骨头前、外侧壁保留角进行预测	外侧壁保留角的临界值为 60.44° , 外侧壁保留角 $\leq 60.44^\circ$ 时随访80个月的塌陷率为91.26%, $>60.44^\circ$ 时塌陷率为21.25%。前侧壁保留角的临界值为 63.89° , 前侧壁保留角 $\leq 63.89^\circ$ 时随访60个月的塌陷率为89.78%, $>63.89^\circ$ 时塌陷率为15.3%

“-”示无数据

1.1 Kerboul 弧度和法 Kerboul 等^[9]根据正、侧位X线片上 ONFH 累及弧度预测塌陷的风险(图1), 结果显示当坏死弧度和 $>200^\circ$ 时塌陷率为100%, $160^\circ\sim 200^\circ$ 时塌陷率为39%, $<160^\circ$ 时塌陷率为0%。笔者认为该方法的优点是操作简单、重复性较高, 缺点是未将股骨头视为一个三维立体结构来评估坏死弧度在整个股骨头中所占的比例; 而且, 将正、侧位X线片显示的受累弧度简单相加会导致部分病灶重复计算, 这些因素都会影响塌陷预测的精确性。

1.2 Sugano 坏死面积百分比法 蛙位X线片在评估塌陷时具有较高的敏感度和准确性, 且蛙位片上坏死位置的延伸是预测 ONFH 预后的可靠指标, 因此联合正位和蛙位X线片可以提高塌陷预测的准确性^[10-12]。Sugano 等^[13]根据坏死病灶在正、侧位X线片上的坏死面积占比进行预测(图2), 发现坏死区域在正位X线片上超过负重区内侧1/3, 侧位片上坏死面

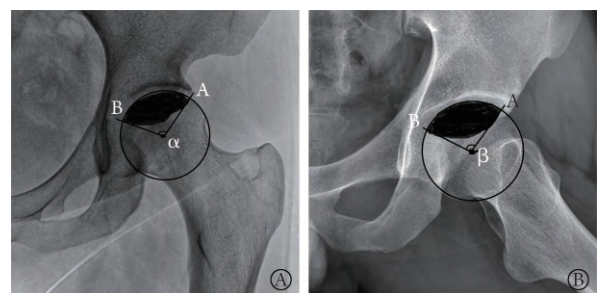


图1 Kerboul 弧度和法预测股骨头塌陷

Fig.1 Kerboul radian sum method for prediction of femoral head collapses

A. 左侧髋关节正位X线片; B. 左侧髋关节蛙位X线片。圆形区域代表股骨头大小, 黑色区域代表坏死病灶, α 与 β 为股骨头中心点, A、B两点是X线片上股骨头表面坏死病灶弧线的两端点

积占比 $>43\%$ 时大面积塌陷率为100%; 坏死面积在正位X线片上未超过负重区内侧1/3, 侧位片上坏死面

积占比 $<43\%$ 时大面积塌陷率为 0% 。该方法强调了正、侧位X线片上坏死面积对塌陷风险预测的重要性,笔者认为弧度和法与坏死面积百分比法本质相似,两种方法都根据髋关节正、侧位X线片预测塌陷进展。不论是坏死面积百分比增加或者坏死弧度和增大,都意味着坏死范围扩大,其塌陷的可能性增高。然而,由于正、侧位X线片不能真实反映病变的大小,因此这两种方法的预测性能都存在局限性。一项纳入45例75髋的回顾性研究显示各种塌陷预测方法的结果差异较大,Ohzono法、Kerboul法、Sugano X线片法、Laffirgue法、Sugano MRI法预测的塌陷率分别为 65.33% 、 68.00% 、 48.00% 、 85.33% 、 81.33% ;与实际塌陷情况相比,Sugano X线片法对塌陷的预测较为准确^[14]。

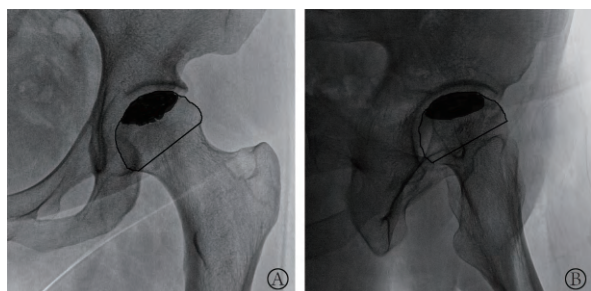


图2 Sugano坏死面积百分比法预测股骨头塌陷

Fig.2 Sugano necrotic area percentage method for prediction of femoral head collapses

A. 左侧髋关节正位X线片; B. 左侧髋关节侧位X线片。直线部分为股骨头、颈交界连线,扇形区域代表整个股骨头大小,黑色区域代表坏死病灶大小

1.3 Utsunomiya 坏死边界法 坏死病灶的位置是影响塌陷进展的主要因素之一,不同部位病灶的塌陷率不同。Kubo等^[15]发现,坏死发生在股骨头前部时,塌陷概率较高。Utsunomiya等^[16]报道,基于患侧股骨头侧方和前方的坏死边界定位预测矩阵是一种简单而有用的塌陷预测手段。Fan等^[17]发现,基于X线正位和蛙位片的完整比可以预测早期ONFH塌陷的发生;以X线正位完整比(APIR)和蛙位完整比(FLIR)为自变量,对坏死病灶边界进行量化和分类,结果显示并非所有股骨头塌陷均意味着预后不良。坏死边界对预测ONFH塌陷进展和指导临床治疗策略具有较高的价值。因此,在选择“保髋”治疗时应尽可能清除位于股骨头前侧及外侧的坏死组织。

1.4 保留角法 颜新昊^[18]发现,前、外侧壁保留角小的ONFH更容易进展为塌陷(图3);对87例121髋随访3~83个月,结果显示,正位X线片上外侧壁保留角的临界值为 60.44° ,当外侧壁保留角 $\leq 60.44^\circ$ 时,股骨头80个月生存率仅为 8.74% ; $>60.44^\circ$ 时,股骨头80个月生存率达 78.75% ;蛙位X线片上前侧壁保留

角的临界值为 63.89° ,当前侧壁保留角 $\leq 63.89^\circ$ 时,股骨头60个月生存率仅为 10.22% ; $>63.89^\circ$ 时,股骨头80个月生存率达 84.7% 。Wei等^[19]通过测量X线片上的股骨头外侧保留角(LPA)、前侧保留角(APA)和联合保留角(CPA)以量化股骨头外侧和前部坏死程度并评估其塌陷风险,发现CPA的预测界临值为 118.7° 。基于X线片量化坏死病灶大小的预测方法操作简便、重复性较强,便于临床医师应用;然而其局限性在于未考虑股骨头的三维立体结构,这严重降低了其预测的准确性。

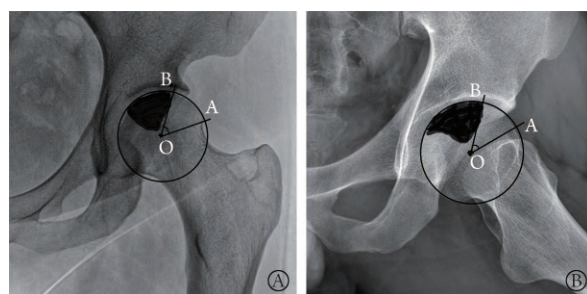


图3 保留角法预测股骨头塌陷

Fig.3 Reserved angle method for prediction of femoral head collapses

A. 左侧髋关节正位X线片; B. 左侧髋关节蛙位X线片。圆形区域代表股骨头大小,黑色区域代表坏死病灶大小,O点为股骨头中心点,A点分别为股骨头前、外侧头颈交界处,B点分别为股骨头硬化带前、外侧边缘, $\angle BOA$ 即为股骨头前、外侧保留角

2 基于CT参数预测

CT扫描是确定病变严重程度和评估治疗方案的有效方法。ONFH早期X线检查不能确诊时,CT检查可以发现病理变化^[20]。此外,相较于X线片,CT图像可更早、更准确地评估软骨下骨折和股骨头塌陷的程度^[8]。

Yu等^[21-22]通过计算CT图像中股骨头冠状面最大的一层及其前后两层的硬化边缘比例,将其作为塌陷预测的参考值并评估其预测价值,发现硬化边缘比例 $>30\%$ 时,股骨头塌陷的风险较高。此外,Yu等^[22]联合Steinberg分期、ABC分型及近端硬化环比例建立了一种预测价值较高的早期ONFH塌陷风险评估体系。Shi等^[23]评估CT图像轴位、冠状位和矢状位上骨吸收的位置发现,初始骨吸收病灶的冠状位最大面积(MAC)可以预测塌陷进展;当 $MAC > 49 \text{ mm}^2$ 且位于股骨头前外侧或外侧柱时,塌陷进展较快。Baba等^[24]在塌陷较重的股骨头前部发现了较高的骨吸收体积比,且塌陷进展速率与骨吸收体积比呈正相关。CT图像能够观察股骨头的微观结构变化、实现三维立体重建和骨密度评估,但在评估早期坏死软组织改变方面不如MRI准确,且与MRI相比,CT

图像无法直接评估血流情况，而骨坏死后血流变化与随后的塌陷相关。

3 基于MRI图像预测

MRI是诊断早期ONFH的金标准^[20,25]。通常认为T₁加权像上表现为低信号，T₂加权像出现高信号内环和低信号外环组成的“双线标”是ONFH的典型特征^[2,8]。近年来，越来越多的研究显示，骨髓水

肿和关节积液也是ONFH的危险因素^[26-29]。相较于其他影像学检查方法，MRI在ONFH诊疗过程中有以下优势：(1)可发现没有明显临床症状的早期坏死；(2)可显示确切的坏死部位、范围和程度；(3)可通过相关技术对病灶进行定量测量。目前，部分学者主要根据坏死部位、信号强度、大小(病灶受累弧度、坏死体积、坏死面积、坏死指数)和坏死病灶形态在MRI图像上的表现进行预测(表2)。

表2 基于MRI图像的股骨头塌陷主要预测方法

Tab.2 Main prediction methods based on MRI images for prediction of femoral head collapses

预测方法	预测依据	临界值及相应风险
坏死体积占比法	将股骨头按标准球体均分为8个象限：前外上(ASL)、后外上(PSL)、前内上(ASM)、后内上(PSM)、前外下(AIL)、后外下(PIL)、前内下(AIM)、后内下(PIM)，计算总的股骨头坏死体积比及各象限的坏死体积比[总坏死体积比(%)=总坏死体积/股骨头体积×100%，各象限坏死体积比(%)=各象限坏死体积/各象限的体积×100%]预测	总坏死体积比19.51%是临界值，总坏死体积比<19.51%时塌陷率为5%，>19.51%时塌陷率为69.05%
坏死面积占比法	在股骨头中冠状位连续4个层面计算坏死区占负重区百分比即 $WB=\alpha/\beta\times 100\%$ (股骨头负重区受累骨皮质对应髁白顶的角度为 α ，股骨头全部负重区骨皮质对应髁白顶的角度为 β)，然后取平均值进行预测	坏死区占负重区百分比45%是临界值，坏死区占负重区百分比<45%时塌陷率为0%，>45%时塌陷率为100%
坏死弧度和法	在中冠状面和中矢状面MRI图像上确定股骨头中心，测量股骨头表面坏死的弧度 α 与 β ，最后计算弧度和($\alpha+\beta$)进行塌陷预测	联合坏死角190°与240°为临界值，联合坏死角≤190°时塌陷率为0，190°~240°时塌陷率为50%，>240°时塌陷率为100%
坏死指数法	在中冠状位和中矢状位的MRI图像上，以股骨头中点为顶点测量坏死区域的角度，即坏死区内、外侧点或前、后侧点与股骨头中心点连线的夹角，分别用A、B表示，冠状位坏死角度为A，矢状位坏死角度为B，坏死指数(%)=(A/180)×(B/180)×100%进行预测	坏死指数53%是临界值，坏死指数≥53%时塌陷率为100%

3.1 坏死体积占比法 Malizos等^[30]将股骨头按标准球体均分为8个象限，发现位于前外上、后外上、前内上、后内上的坏死病灶容易发生塌陷(图4)。张萌萌等^[26]采用上述方法报道股骨头总坏死体积百分比预测塌陷的最佳临界值为19.51%，总坏死体积占比<19.51%时塌陷率为5%，总坏死体积占比>19.51%时塌陷率为69.05%，若综合考虑前外上及后外上的坏死体积比，该临界值预测塌陷发生的概率达80.77%。Nishii等^[31]将坏死病灶占股骨头体积百分比分为3组：A组坏死体积百分比<15%，塌陷率为6%；B组坏死体积百分比为15%~30%，塌陷率为42%；C组坏死体积百分比>30%，塌陷率为80%。赵万鹏等^[32]通过MRI图像构建三维预测模型，发现当坏死病灶体积占比>30%时，股骨头塌陷率高达80%；坏死病灶体积占比<30%时，坏死病灶的位置对塌陷起决定性作用。Ansari等^[33]报道，与改良Kerboul角和改良坏死指数相比，坏死病灶体积测量在预测塌陷时更准确，且坏死病灶体积25%为塌陷预测的临界值。测量坏死体积以将病灶大小具体化，尤其结合象限分法后可进一步确定病灶位置，使其预测性能更加准确，但坏死病灶形态通常是不规则的，导致体积测量时步骤较为复杂，临床可操作性不强。

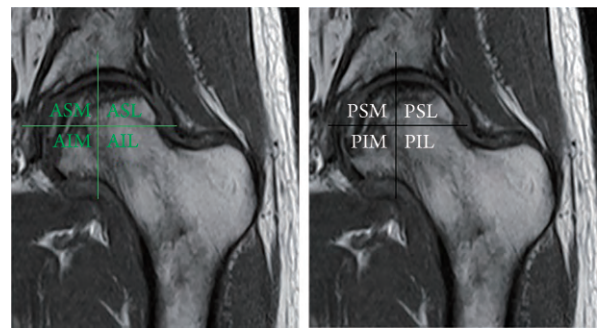


图4 坏死体积占比法预测股骨头塌陷

Fig.4 Necrosis volume ratio percentage method for prediction of femoral head collapses

左侧髋关节冠状位MRI图像视为标准球体的股骨头球心做3个两两互相垂直的平面，将其分为前外上(ASL)、后外上(PSL)、前内上(ASM)、后内上(PSM)、前外下(AIL)、后外下(PIL)、前内下(AIM)、后内下(PIM)等8个象限

3.2 坏死面积占比法 Sugano等^[13]发现，正位X线片上坏死面积超过负重面内侧的1/3，且侧位X线片上坏死面积超过整个股骨头的43%，则提示ONFH将进展至塌陷。Lafforgue等^[34]根据坏死区域在负重区所占比值进行预测(图5)，发现坏死区占负重区比值<45%时塌陷率为0%，>45%时塌陷率为100%。赵凤朝等^[35]发现坏死表面积比>33%是股骨头塌陷的临

界值。此外，他们还发现坏死面积比不随时间延长而变化，且相较坏死指数相比更能准确地预测塌陷是否发生^[36]。李子荣等^[37]发现，预测塌陷时坏死面积比 $<30\%$ 为低危， $30\% \sim 60\%$ 为中危， $>60\%$ 为高危。笔者认为采用坏死病灶占比特别是其占负重区的大小进行塌陷预测时，预测性能得到大幅度提升，但此种方法计算过程复杂，可重复性和临床可操作性不强。



图5 Lafforgue 坏死面积占比法预测股骨头塌陷

Fig.5 Lafforgue necrotic area percentage method for prediction of femoral head collapses

左侧髋关节冠状位MRI图像中，圆形区域代表股骨头大小，黑色区域代表坏死病灶，黄色弧线代表股骨头全部负重区， α 与 β 为股骨头中心点， α 角为股骨头负重区受累骨皮质对应髋臼顶的角度， β 角股骨头全部负重区骨皮质对应髋臼顶的角度

3.3 改良坏死弧度和法 Ha等^[38]使用改良Kerboul法在正中冠状位和矢状位MRI图像上测量股骨头表面坏死的弧度，然后计算弧度总和，结果显示改良Kerboul角越大股骨头塌陷的风险越高(图6)；进一步研究显示，联合坏死角 $<190^\circ$ 为低危组，随访期间无关节塌陷；联合坏死角 $190^\circ \sim 240^\circ$ 为中危组，有50%的患者出现关节塌陷；联合坏死角 $>240^\circ$ 为高危组，所有关节进展为塌陷。另一项研究发现，改良Kerboul角联合坏死角 $>250^\circ$ 时治疗效果较差^[39]。但是，坏死病灶通常是立体、不规则的，且坏死部位具有多样性，仅通过正中冠状位和矢状位MRI图像并不能真实体现病变大小。

3.4 坏死指数法 Koo等^[40]在正中冠状位和矢状位MRI图像上通过计算坏死区域角度预测塌陷的风险(图7)，发现坏死指数 $\leq 33\%$ 为低危，不会塌陷； $34\% \sim 66\%$ 为中危，部分出现塌陷； $67\% \sim 100\%$ 为高危，塌陷风险较高。Cherian等^[41]根据冠状面及矢状面MRI图像上病灶累及范围最大的层面测量坏死指数，以更加准确地反映坏死病灶的大小，发现坏死指数、改良坏死指数、坏死面积百分比均具有可靠的塌陷预测性能。陈志清等^[42]发现，Hungerford分期与坏死指数呈明显正相关，坏死指数53%可作为股骨头塌陷发生的预测临界值。

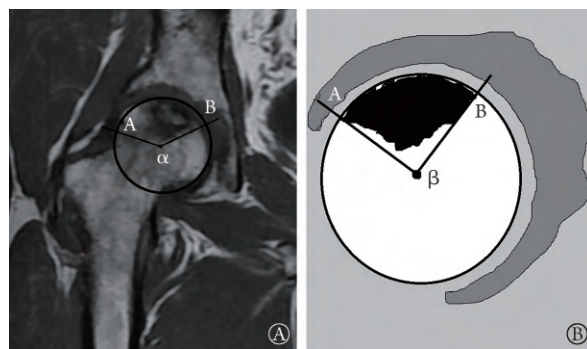


图6 改良Kerboul弧度和法预测股骨头塌陷

Fig.6 Modified Kerboul radian sum method for prediction of femoral head collapses

A. 髋关节正中冠状位MRI图像；B. 髋关节正中矢状位MRI图像。圆形区域代表股骨头大小， α 与 β 为股骨头中心点，A、B两点为股骨头表面坏死病灶弧线的两侧端点

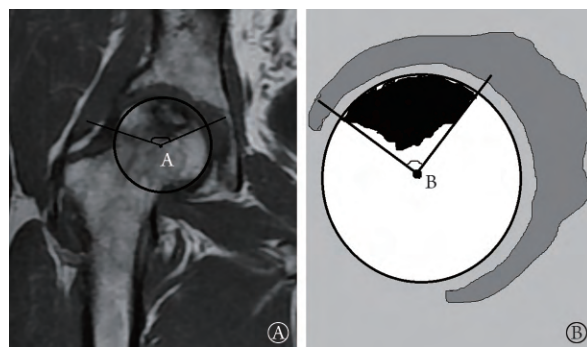


图7 坏死指数法预测股骨头塌陷

Fig.7 Necrosis index method for prediction of femoral head collapses

A. 髋关节正中冠状位MRI图像；B. 髋关节正中矢状位MRI图像。圆形区域代表股骨头大小，黑色区域代表坏死病灶大小， α 、 β 为股骨头中心点，角 α 为坏死区内、外侧点与股骨头中心连线的夹角，角 β 为坏死区前、后侧点与股骨头中心连线的夹角

3.5 根据坏死信号或血流变化预测 Beltran等^[43]发现，股骨头冠状位及轴位MRI图像上异常信号区域越大则塌陷率越高。Kokubo等^[44]发现，股骨头正中冠状位MRI图像上硬化带横穿过股骨头，提示塌陷的可能性较大。Shimizu等^[45]发现，股骨头内出现混合信号，提示塌陷的可能性较大。MRI信号改变在塌陷预测中并不常用，且MRI信号异常不能定量测量，因此在评估塌陷进展时不能通过客观数据分析。Zheng等^[1]发现，股骨头外侧柱的血流状态与塌陷相关，外侧柱血供良好，即使内部区域缺血，股骨头仍保留完整形态；外侧柱保留部分血供(上支持带动脉)时，股骨头塌陷率较低。因此，临床行“保髋”手术时应尽量重建股骨头外侧柱血供，从而延缓股骨头塌陷进展。尽管Zheng等^[1]的研究提示股骨头外侧区域血供与其塌陷相关，但并未确定外侧柱血流缺失导致塌陷进展的范围或临界值。

3.6 根据坏死部位预测 坏死部位分析在临床治疗中常见,并且与ONFH分期密切相关,常被用于预测塌陷。坏死部位分析最初采用X线片,随后引入MRI。研究显示,坏死灶位于股骨头前部是发生塌陷的重要风险因素^[46]。Shimizu等^[45]发现,坏死区占负重区比例越高塌陷率越高。当坏死区占负重区比例超过2/3时塌陷率为100%^[47]。Sun等^[48]报道,ONFH是否进展为塌陷主要取决于外侧柱的保留情况,外侧柱保留程度越高,塌陷发生的可能性越低。另一项研究显示,股骨头塌陷开始于外侧柱的坏死病灶,且所有塌陷区域均累及外侧柱坏死边缘^[1]。

3.7 根据坏死形态预测 张萌萌等^[26]发现,坏死病灶的形态与塌陷进展有关,中央型坏死塌陷率为14.89%,周围型坏死塌陷率为82.76%。Wu等^[49]将坏死病灶形态分为4型:I型,横形;II型,V形;III型,“之”字形;IV型,封闭型;同时发现坏死病灶形态为横形时塌陷风险最高。进行塌陷预测时,单一异常坏死信号或坏死病灶形态无法作为客观数据进行测量或计算,但可用作其他预测方法的辅助判断。

4 有限元分析

在ONFH塌陷前阶段,有限元分析是一种潜在的塌陷预测方法。研究发现,三维有限元应力分析法为塌陷预测提供了可能的技术创新^[50-54]。Li等^[52]通过三维有限元分析发现,von Mises应力最大值对股骨头塌陷具有较好的预测价值,选取2.7801 MPa的应力水平作为截断值时,预测准确度高达80%。Bahk等^[53]发现,股骨头外侧柱和初级受压骨小梁的应力集中可以预测ONFH的未来塌陷。陆舜等^[54]通过有限元分析发现,股骨头塌陷的风险与其APA及LPA呈负相关,该结果与颜新昊^[18]的研究结果相似。各种有限元分析提示在临床“保髋”手术中尽可能挽救并保留外侧柱可能是防止进一步塌陷的关键。

5 其他预测方法

Lin等^[55]发现,髋关节内侧间隙比(MSR)与ONFH塌陷相关,当MSR>20.35时,塌陷率明显增高。Xu等^[56]将站立位骨盆矢状位量化为骨盆前平面在矢状位上与垂直Z轴形成的角度(APP角),APP角0°表示骨盆后侧倾斜,结果显示站立位骨盆后倾可能与ONFH塌陷进展相关,且APP角与塌陷速度呈负相关。林天焯等^[57]发现,股骨颈骨强度综合指数相较骨转换标志物能更好地预测ONFH塌陷的发生,其中抗冲击强度指数0.465是潜在的临界值,低于该值可以预测早期非创伤性ONFH塌陷的发生。该结果与Lin等^[58]的研究结果相似,但Lin等^[58]的研究中

抗冲击强度指数0.435是塌陷预测的临界值。最近一项研究显示,ONFH塌陷前期坏死灶外侧边界的骨密度比值对后续股骨头塌陷的发生具有较好的预测价值^[59]。

6 总结与展望

近年来,预测ONFH塌陷的方法以影像学分析法和有限元分析法为主。塌陷预测研究主要集中在评估塌陷的手段或工具、导致塌陷进展的相关因素以及预测方法的准确性和可重复性。目前,各种塌陷预测方法主要基于X线、CT、MRI图像,以计算或判断坏死病灶的大小和位置为主。然而,各种预测方法的准确性和临床可操作性有较大差异。ONFH塌陷与否是临床治疗选择的临界点,同时也是评估早期ONFH治疗效果的重要参考依据。因此,准确预测早期ONFH的塌陷风险尤为重要。但是,塌陷进展受坏死病灶的位置、体积、表面积、形态和立体结构等多因素影响,依据单一塌陷风险因素或方法并不能展示较高的预测性能。因此,未来或许可从以下几个角度探索新的塌陷预测方法或阻止塌陷进展。

(1)炎症反应。ONFH的本质是骨组织和骨髓内细胞的死亡,骨结构及其强度完好,而骨吸收和骨结构破坏是其进展的结果。骨吸收是通过炎症反应实现的,而炎症反应在某种程度上是可以调控的,因此,或许可通过研究骨吸收时某些炎症指标的变化来预测塌陷进展。

(2)病理修复方式。骨坏死后不同修复方式也是决定塌陷进展的重要因素,包括有限性修复、破坏性修复和重建性修复。股骨头塌陷并不一定意味着预后不良,部分股骨头塌陷后经历有限性修复和重建性修复,其塌陷并未继续进展。这部分患者股骨头塌陷程度<2 mm且坏死病灶小于负重区内侧2/3,通常无需手术干预,有较高的概率停止塌陷并缓解症状。因此,未来研究或许可通过动物实验来探索如何触发不同修复方式的机制或信号通路,以预测或阻止ONFH塌陷进展。

(3)多模态影像融合。利用人工智能技术对大规模临床数据进行分析,结合不同影像学技术如MRI、CT等的信息,进行多模态影像融合分析,可以更全面地评估ONFH塌陷情况,并提高预测的准确性^[60]。

综上所述,目前仍缺乏一种操作简单、重复性好、预测准确性高的可供临床医师使用的ONFH塌陷预测方法。30多年来无数学者希望在ONFH早期对病变做出准确评估以期对不同患者制定针对性、个体化的诊疗方案。随着医学技术的发展,现有ONFH塌陷预测方法展现了较为满意的结果。但是,

单一的塌陷预测方法准确度不高。ONFH塌陷进展受多因素共同作用，未来应着力于优化出一种联合不同指标、结合多种方法、操作简单、准确度高、重复性好的预测系统。

【参考文献】

- [1] Zheng GS, Qiu X, Wang BJ, *et al.* Relationship between blood flow and collapse of nontraumatic osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2022, 104(Suppl 2): 13-18.
- [2] 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(3): 125-130.
- [3] 刘天洋, 孙伟, 高福强, 等. 股骨头坏死CJFH分型的系统评价[J]. *医学新知*, 2024, 34(7): 744-755.
- [4] Tan B, Li W, Zeng P, *et al.* Epidemiological study based on China osteonecrosis of the femoral head database[J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(1): 153-160.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Hernigou P. Revisiting prediction of collapse in hip osteonecrosis with artificial intelligence and machine learning: a new approach for quantifying and ranking the contribution and association of factors for collapse[J]. *Int Orthop*, 2023, 47(3): 677-689.
- [8] Sun W, Wang BL, Li ZR. Chinese specialist consensus on diagnosis and treatment of osteonecrosis of the femoral head[J]. *Orthop Surg*, 2011, 3(2): 131-137.
- [9] Kerboul M, Thomine J, Postel M, *et al.* The conservative surgical treatment of idiopathic aseptic necrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1974, 56(2): 291-296.
- [10] Wei QS, He MC, He XM, *et al.* Combining frog-leg lateral view may serve as a more sensitive X-ray position in monitoring collapse in osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Hip Preserv Surg*, 2022, 9(1): 10-17.
- [11] Cheng W, Xian H, Wang L, *et al.* Frog leg lateral view is a reliable predictor of the prognosis in osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Orthop Res*, 2021, 39(5): 950-958.
- [12] Yang F, Deng X, Xin P, *et al.* The value of the frog lateral view radiograph for detecting collapse of femur head necrosis: a retrospective study of 1001 cases[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 811644.
- [13] Sugano N, Takaoka K, Ohzono K, *et al.* Prognostication of nontraumatic avascular necrosis of the femoral head. Significance of location and size of the necrotic lesion[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1994, (303): 155-164.
- [14] 陈卫衡, 谢文光, 王智耀, 等. 非创伤性股骨头坏死的塌陷预测优化研究[J]. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2012, 4(11): 28-33.
- [15] Kubo Y, Motomura G, Ikemura S, *et al.* The effect of the anterior boundary of necrotic lesion on the occurrence of collapse in osteonecrosis of the femoral head[J]. *Int Orthop*, 2018, 42(7): 1449-1455.
- [16] Utsunomiya T, Motomura G, Yamaguchi R, *et al.* Effects of the location of both anterior and lateral boundaries of the necrotic lesion on collapse progression in osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Orthop Sci*, 2024, 29(2): 552-558.
- [17] Fan Y, Zhang J, Chen M, *et al.* Diagnostic value of necrotic lesion boundary in bone collapse of femoral head osteonecrosis[J]. *Int Orthop*, 2022, 46(3): 423-431.
- [18] 颜新昊. 股骨头前、外侧壁保留角与股骨头坏死塌陷的相关性研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2022.
- [19] Wei QS, Li ZQ, Hong ZN, *et al.* Predicting collapse in osteonecrosis of the femoral head using a new method: preserved angles of anterior and lateral femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2022, 104(Suppl 2): 47-53.
- [20] 应金龙. 《骨科临床诊断与手术学》出版: 比较分析CT和核磁共振诊断对股骨头坏死的准确率[J]. *介入放射学杂志*, 2023, 32(1): 108.
- [21] Yu T, Xie L, Zhang Z, *et al.* Prediction of osteonecrosis collapse of the femoral head based on the proportion of the proximal sclerotic rim[J]. *Int Orthop*, 2015, 39(6): 1045-1050.
- [22] Yu T, Xie LM, Zhang ZN, *et al.* Clinical study on new risk assessment and prediction system for early osteonecrosis of the femoral head[J]. *Zhongguo Gu Shang*, 2021, 34(7): 617-622.
- [23] Shi S, Luo P, Sun L, *et al.* Prediction of the progression of femoral head collapse in ARCO stage 2-3A osteonecrosis based on the initial bone resorption lesion[J]. *Br J Radiol*, 2021, 94(1117): 20200981.
- [24] 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.
- [25] Pierce TP, Jauregui JJ, Cherian JJ, *et al.* Imaging evaluation of patients with osteonecrosis of the femoral head[J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2015, 8(3): 221-227.
- [26] 张萌萌, 汝晓双, 范鸿禹, 等. 基于MRI征象与坏死体积测量对非创伤性股骨头坏死塌陷预测价值的初步研究[J]. *磁共振成像*, 2017, 8(4): 296-301.
- [27] 魏秋实, 何伟, 张庆文, 等. 围塌陷期股骨头坏死不同影像学表现研究[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35(9): 1105-1110.
- [28] Liu B, Yi H, Zhang Z, *et al.* Association of hip joint effusion volume with early osteonecrosis of the femoral head[J]. *Hip Int*, 2012, 22(2): 179-183.
- [29] Hatanaka H, Motomura G, Ikemura S, *et al.* Differences in magnetic resonance findings between symptomatic and asymptomatic pre-collapse osteonecrosis of the femoral head[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 112: 1-6.
- [30] Malizos KN, Sifakas MS, Fotiadis DI, *et al.* An MRI-based semiautomated volumetric quantification of hip osteonecrosis[J]. *Skeletal Radiol*, 2001, 30(12): 686-693.
- [31] Nishii T, Sugano N, Ohzono K, *et al.* Significance of lesion size and location in the prediction of collapse of osteonecrosis of the femoral head: a new three-dimensional quantification using magnetic resonance imaging[J]. *J Orthop Res*, 2002, 20(1): 130-136.
- [32] 赵万鹏, 林峰, 卢清萍, 等. 三维重建和体积测量法预测股骨头坏死的塌陷[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(11): 20-23.
- [33] Ansari S, Goyal T, Kalia RB, *et al.* Prediction of collapse in femoral head osteonecrosis: role of volumetric assessment[J]. *Hip Int*, 2022, 32(5): 596-603.

- [34] Lafforgue P, Dahan E, Chagnaud C, *et al.* Early-stage avascular necrosis of the femoral head: MR imaging for prognosis in 31 cases with at least 2 years of follow-up[J]. *Radiology*, 1993, 187(1): 199-204.
- [35] 赵凤朝, 李子荣, 张念非, 等. 股骨头坏死表面积测量及在股骨头塌陷预测中的应用[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2005, 19(9): 687-691.
- [36] 赵凤朝, 李子荣, 张念非, 等. 坏死面积比例在预测股骨头塌陷中的价值[J]. *中华骨科杂志*, 2005, 25(9): 520-523.
- [37] 李子荣, 张念非, 史振才, 等. 股骨头坏死塌陷的预测与治疗方法的选择[J]. *中华骨科杂志*, 2003, 23(4): 193-196.
- [38] Ha YC, Jung WH, Kim JR, *et al.* Prediction of collapse in femoral head osteonecrosis: a modified Kerboul method with use of magnetic resonance images[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2006, 88(Suppl 3): 35-40.
- [39] Boontanapibul K, Huddleston JI, 3rd, Amanatullah DF, *et al.* Modified kerboul angle predicts outcome of core decompression with or without additional cell therapy[J]. *J Arthroplasty*, 2021, 36(6): 1879-1886.
- [40] Koo KH, Kim R. Quantifying the extent of osteonecrosis of the femoral head. A new method using MRI[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1995, 77(6): 875-880.
- [41] Cherian SF, Laorr A, Saleh KJ, *et al.* Quantifying the extent of femoral head involvement in osteonecrosis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2003, 85(2): 309-315.
- [42] 陈志清, 刘智, 田永刚, 等. 股骨头缺血坏死MRI分期与坏死指数的相关性[J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29(3): 220-223.
- [43] Beltran J, Knight CT, Zuelzer WA, *et al.* Core decompression for avascular necrosis of the femoral head: correlation between long-term results and preoperative MR staging[J]. *Radiology*, 1990, 175(2): 533-536.
- [44] Kokubo T, Takatori Y, Ninomiya S, *et al.* Magnetic resonance imaging and scintigraphy of avascular necrosis of the femoral head. Prediction of subsequent segmental collapse[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1992, (277): 54-60.
- [45] Shimizu K, Moriya H, Akita T, *et al.* Prediction of collapse with magnetic resonance imaging of avascular necrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1994, 76(2): 215-223.
- [46] Kubo Y, Motomura G, Ikemura S, *et al.* Effects of anterior boundary of the necrotic lesion on the progressive collapse after varus osteotomy for osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Orthop Sci*, 2020, 25(1): 145-151.
- [47] Sugano N, Ohzono K, Masuhara K, *et al.* Prognostication of osteonecrosis of the femoral head in patients with systemic lupus erythematosus by magnetic resonance imaging[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1994, (305): 190-199.
- [48] Sun W, Li ZR, Wang BL, *et al.* Relationship between preservation of the lateral pillar and collapse of the femoral head in patients with osteonecrosis[J]. *Orthopedics*, 2014, 37(1): e24-8.
- [49] 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.
- [50] 崔旭, 赵德伟, 古长江. 股骨头缺血性坏死塌陷预测的生物力学研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23(2): 193-198.
- [51] Wen PF, Guo WS, Zhang QD, *et al.* Significance of lateral pillar in osteonecrosis of femoral head: a finite element analysis[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2017, 130(21): 2569-2574.
- [52] Li TX, Huang ZQ, Li Y, *et al.* Prediction of collapse using patient-specific finite element analysis of osteonecrosis of the femoral head [J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(5): 794-800.
- [53] Bahk JH, Jo WL, Kim SC, *et al.* Lateral pillar is the key in supporting pre-collapse osteonecrosis of the femoral head: a finite element model analysis of propensity-score matched cohorts[J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16(1): 728.
- [54] 陆舜, 林天焯, 何敏聪, 等. 基于前外侧保留角预测股骨头坏死塌陷的有限元分析[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2023, 37(11): 1394-1402.
- [55] Lin T, Li K, Chen W, *et al.* Relationship between hip joint medial space ratio and collapse of femoral head in non-traumatic osteonecrosis: a retrospective study[J]. *J Hip Preserv Surg*, 2021, 8(4): 311-317.
- [56] Xu M, Motomura G, Ikemura S, *et al.* Posterior pelvic tilt in the standing position might be associated with collapse progression in post-collapse stage osteonecrosis of the femoral head[J]. *Orthop Surg*, 2022, 14(12): 3201-3208.
- [57] 林天焯, 杨鹏, 蔡开沈, 等. 股骨颈骨强度综合指数对非创伤性坏死的股骨头塌陷预测作用[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35(8): 967-972.
- [58] Lin T, Cai K, Yang P, *et al.* Composite indices of femoral neck strength predicts the collapse of steroid-associated osteonecrosis of the femoral head: a retrospective study[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1): 722.
- [59] Xu M, Motomura G, Utsunomiya T, *et al.* Effects of bone mineral density at the lateral sclerotic boundary on the femoral head collapse onset in osteonecrosis of the femoral head: a preliminary study[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2024, 111: 106156.
- [60] 付佳豪, 陈浩, 席洪钟, 等. 深度学习在股骨头坏死诊疗中的应用进展[J]. *解放军医学杂志*, 2025, 50(10): 1235-1242.

(责任编辑: 纪方方)