论 著

基于髌骨磁共振影像组学和Delta影像组学模型预测骨关节炎发生*

彭 宜[1] 姜 海[1] 肖巧凤[1]
冯 悦[2] 罗雪柯[2] 左后东[1,*]
1.川北医学院附属医院放射科
2.川北医学院 (四川 南充 637000)

【摘要】**目的** 提取髌骨MRI影像组学特征，建立预测2年内膝骨关节炎(KOA)发生的影像组学模型及Delta模型。**方法** 基于公开数据库骨关节炎倡议(OAI)按临床信息匹配病例组与对照组各223例，以7:3分为训练组(312例)与验证组(134例)。采用LASSO回归进行特征降维、并使用支持向量机(SVM)构建预测模型。使用受试者工作特征(ROC)曲线评价模型的预测能力，并使用Delong检验比较模型的预测效能。**结果** 基线、12M、Delta模型训练组AUC分别为0.787、0.868、0.870，验证组为0.782、0.829、0.837；临床模型训练组AUC为0.595，验证组为0.589。影像组学模型与临床模型差异显著(P<0.05)。**结论** 基于髌骨MRI的影像组学模型预测KOA发生效能良好，优于临床模型，其中Delta模型最佳。

【关键词】骨关节炎；髌骨；影像组学；磁共振成像
【中图分类号】R445.2
【文献标识码】A
【基金项目】国家自然科学基金(81701756)；四川省自然科学基金(2025ZNSFSC0650)；南充市市校战略合作项目(22SXZRKX0005)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.04.049

Radiomics Models and Delta-radiomics Model Based on Magnetic Resonance Imaging of Patella to Predict the Occurrence of Osteoarthritis*

PENG Yi[1], JIANG Hai[1], XIAO Qiao-feng[1], FENG Yue[2], LUO Xue-ke[2], ZUO Hou-dong[1,*].
1.Department of Radiology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan Province, China
2.North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan Province, China

ABSTRACT
Objective To extract radiomics features from the magnetic resonance imaging (MRI) of patella, and establish radiomics models and Delta radiomics model to predict the occurrence of knee osteoarthritis (KOA) within 2 years. ***Methods*** The data were obtained from the open database Osteoarthritis initiative (OAI). 223 patients in the case group were matched with 223 controls according to clinical information, and then divided into a training set (n=312) and a validation set (n=134) at a ratio of 7:3. LASSO regression was used for feature dimensionality reduction, and a support vector machine (SVM) was employed to construct the prediction models. The predictive performance was evaluated using receiver operating characteristic (ROC) curves, and the DeLong test was used to compare the predictive efficacy among models. ***Results*** For the baseline, 12M, and Delta radiomic models, the AUCs in the training set were 0.787, 0.868, and 0.870, respectively; the AUCs in the validation set were 0.782, 0.829, and 0.837, respectively. For the clinical model, the AUC was 0.595 in the training set and 0.589 in the validation set. There were significant differences between the radiomic models and the clinical model (P<0.05). ***Conclusion*** The radiomic models based on patellar MRI demonstrate good performance in predicting KOA occurrence and are superior to the clinical model, with the Delta radiomic model showing the best predictive performance.

Keywords: Osteoarthritis; Patella; Radiomics; Magnetic Resonance Imaging

骨关节炎(osteoarthritis, OA)是致残最常见的疾病之一[1]。多由关节软骨破坏引起软骨下骨和周围结构损伤[2]。关节炎通常发生于承重大关节，以膝骨关节炎 (Knee osteoarthritis, KOA) 最为常见[3]。既往研究多关注胫股关节，忽略了髌骨的作用，有研究表明髌骨形状异常可能是KOA的高危因素，且髌骨病理改变出现较早，可作为KOA的早期指标[4]。

KOA高危人群包括年龄＞40岁、女性、超重/肥胖、有膝关节损伤史者。随着我国老龄化加重、肥胖人数增多，KOA患病率持续上升[4-5]。现有治疗仅能缓解症状，无法延缓疾病进展[6]。因此，基于危险因素早期识别高危人群、提前预测和诊断，在不可逆阶段前干预，对降低患病率和延缓病情至关重要。

诊断KOA主要依靠X线及磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)。X线采用Kellgren and Lawrence (KLG)分级系统作为分级标准，由轻到重分为0~4级。MRI对关节软骨、软骨下骨、韧带、滑囊等病变敏感，优势独特[7-8]。

影像组学高通量提取影像中肉眼不可见的特征，扩展信息量[9]。Delta影像组学通过分析不同时间或条件下影像特征的差异，反映疾病变化趋势和治疗效果[10]。目前，影像组学已应用于骨骼肌肉系统，用于骨关节炎的诊断、分级、进展及预后预测等[11-12]。但较少关注髌骨在KOA中的作用，且大多仅基于单一时间点影像。本研究基于基线和12个月 (12 Months, 12M) 时髌骨的MRI图像建立单一时间点和Delta影像组学模型预测2年内KOA的发生，以辅助临床医生及时干预高危患者，延缓疾病发生或进展。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究数据源自骨关节炎倡议(osteoarthritis Initiative, OAI)，共纳入4796名参与者(9592个膝关节)，58%为女性，入组年龄45~79岁，含临床及影像数据。KOA发生定义为基线KL 0~1级且24个月时KL 2~4级；未发生定义为基线与24个月均为KL 0-1级。将发生KOA者纳入病例组，按1∶1匹配性别、年龄(±5岁)、BMI、膝关节损伤及手术史，排除资料缺失或图像质量不佳者，最终纳入446人(病例组与对照组各223人)。

1.2 扫描方法 所有参与者在基线时和12M、24M时均拍摄后前位膝关节 X 线片，并由放射科医生进行KL等级评分。MRI图像采用西门子3.0T核磁共振机器采集，本研究选用矢状位中位加权脂肪抑制快速自旋回波序列(sagittal intermediate-weighted fat-saturated turbo spin echo sequences, SAG IW FS TSE)进行感兴趣区域分割[13]。

1.3 临床特征 本研究选择年龄、性别、BMI、外伤史(问卷中“右膝/左膝，曾受伤致行走能力受限至少两天”)、手术史(问卷中“右膝/左膝，曾接受手术或关节镜”)作为临床资料。

【第一作者】彭 宜，女，硕士研究生，主要研究方向：放射影像学。E-mail：p1penny@163.com
【通讯作者】左后东，男，教授，主要研究方向：骨肌系统影像及分子影像研究。E-mail：zuohoud@163.com

1.4 图像分割、特征提取 本研究由放射科医师使用3D Slicer在基线及12M的膝关节MRI图像上手动勾画整个髌骨作为感兴趣区(region of interest, ROI)。通过3D Slicer PyRadiomics 模块提取影像组学特征，包括形状特征、直方图特征、纹理特征、灰度共生矩阵(GLCM)、灰度依赖矩阵(GLDM)、灰度共生长度矩阵(GLRLM)、灰度大小区域矩阵(GLSZM)、相邻灰度差异矩阵(NGTDM)共1130个影像组学特征。为提高数据可比性，采用Z-score标准化对影像组学特征进行预处理。

1.5 一致性检验 为保证影像组学特征的稳定性，随机抽取50例膝关节图像用于观察者内及观察者间一致性检验。两名放射科医师采用盲法分别对这50例图像进行ROI分割，以计算组间相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)。其中一名放射科医师间隔一个月再次对这50例图像进行ROI分割，计算组内相关系数(interclass correlation coefficient, ICC)。选取一致性较好的特征(ICC≥0.75)，以获得更稳定的结果。计算基线、12M时影像组学特征值的变化，Delta特征值=12M影像组学特征值-基线影像组学特征值。

1.6 特征降维 特征提取后，对满足正态分布和方差齐性的特征采用独立样本t检验进行预降维，对不满足以上条件的特征采用Mann-Whitney U检验处理，再利用LASSO及十倍交叉验证筛选最优影像组学特征，以避免过拟合。

1.7 模型建立 比较Logistic回归、决策树、随机森林、支持向量机(support vector machines, SVM)和AdaBoost五种算法建立的影像组学模型，选择预测性能最优的SVM，通过十倍交叉验证优化核参数γ(0.001-1)和正则化参数C(1-1000)。采用受试者工作曲线(receiver operating characteristic, ROC)、曲线下面积(Area Under ROC Curve, AUC)、敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值、精确度、F1值评价模型性能，并用Delong检验比较影像组学模型与临床模型的差异。

1.8 统计分析 采用SPSS 25.0分析临床数据。首先对定量数据进行正态性检验，满足正态分布的数据用平均值±标准差($\bar{x}\pm s$)描述；对符合方差齐性的数据进行t检验，不符合方差齐性的数据进行Mann-Whitney U检验。对定性数据使使用卡方检验比较组间差异，并用[n(%)]表示。*P*<0.05表示差异有统计学意义。

2 结　果

2.1 临床特征和影像学特征 为减少混杂因素、提高可比性，按1∶1为病例组匹配对照组。排除资料缺失或图像不佳者后，共纳入446人(病例组与对照组各223人)。训练组与验证组中，病例组与对照组间的年龄、性别、BMI、损伤史、手术史均无显著差异(*P* >0.05)；两组间上述变量亦无显著差异(*P*'>0.05)。临床信息见表1。

表1 参与者临床信息

变量	训练组 (n = 312)			验证组 (n = 134)			*P*'值
	对照组(n=156)	病例组(n=156)	*P*值	对照组(n=67)	病例组(n=67)	*P*值	
女性[n (%)]	99(63.5%)	104(66.7%)	0.317	44(65.7%)	49(73.1%)	0.227	0.218
年龄/岁	60.67±8.58	59.62±8.3	0.275	62.64±8.11	60.76±8.09	0.181	0.073
BMI (kg/m^2)	29.45±4.58	29.87±4.59	0.414	28.57±3.36	29.46±4.23	0.181	0.152
膝关节损伤史/无 [n (%)]	92(59.0%)	96(61.5%)	0.364	33(49.3%)	36(53.7%)	0.365	0.054
膝关节手术史/无[n (%)]	130(83.3%)	128(82.1%)	0.441	55(82.1%)	53(79.1%)	0.414	0.343

注：*P*<0.05视为有统计学差异； *P*'表示训练组和验证组间的差异性分析；身体质量指数：Body Mass Index, BMI

2.2 一致性检验 经组内一致性检验(平均ICC: 0.837, 范围0.751-1.000)与组间一致性检验(平均ICC: 0.602, 范围0.750~0.996)后，共剔除691个特征，最终保留439个影像学特征用于后续降维。

2.3 特征选择和建模 使用Lasso进行特征选择后，基线时选择出9个影像组学特征用于建模，12M时选择出22个影像组学特征用于建模，Delta选择出23个影像组学特征用于建模。基线时影像组学模型训练组AUC为0.787，验证组AUC为0.782。12 M时影像组学模型训练组AUC为0.868，验证组AUC为0.829。Delta影像组学模型训练组AUC为0.870，验证组AUC为0.837。临床模型训练组AUC为0.595，验证组AUC为0.589。Delong检验表明影像组学模型和临床模型具有统计学差异(*P*<0.05)。详见表2、图1及图2。

表2 各模型在KOA发生队列训练集和测试机中的预测性能

	AUC (95% CI)	敏感性	特异性	阳性预测率	阳性预测率	精确度	F1
基线							
训练集	0.787 (0.737-0.838)	0.551	0.853	0.789	0.655	0.702	0.649
测试集	0.782(0.705-0.859)	0.567	0.821	0.760	0.655	0.694	0.650
12M							
训练集	0.868(0.827-0.908)	0.776	0.865	0.852	0.794	0.821	0.812
测试集	0.829(0.760-0.898)	0.761	0.746	0.750	0.748	0.754	0.756
Delta							
训练集	0.870(0.831-0.909)	0.801	0.795	0.796	0.800	0.798	0.799
测试集	0.837(0.769-0.906)	0.836	0.731	0.767	0.817	0.784	0.794
临床							
训练集	0.595(0.532-0.658)	0.526	0.583	0.558	0.552	0.554	0.541
测试集	0.589(0.492-0.686)	0.463	0.448	0.456	0.455	0.455	0.459

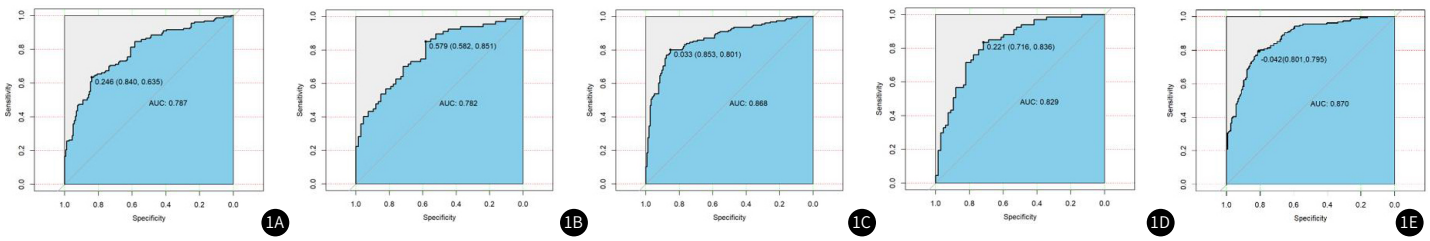

图1 模型预测效能。
图1A、1B：基线时影像组学模型训练组和验证组；图1C、1D：12M时影像组学模型训练组和验证组；
图1E、1F：Delta影像组学模型训练组和验证组；图1G、1H：临床模型训练组和验证组。

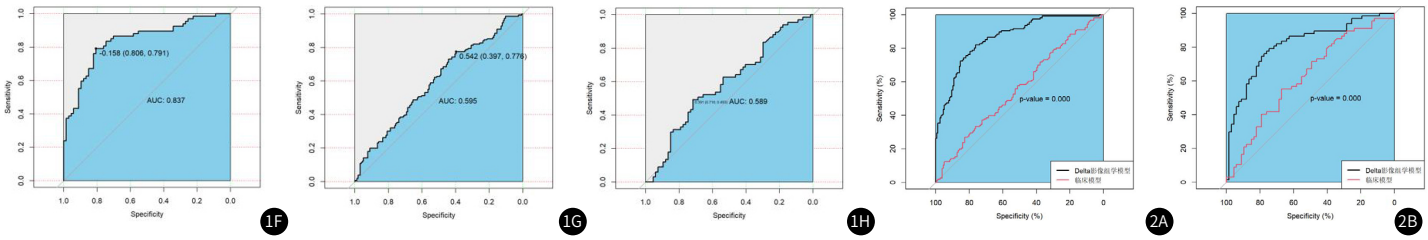

图2 Delong检验。图2A训练组ROC曲线比较；图2B验证组ROC曲线比较。

3 讨 论

本研究基于基线及12M髌骨MRI影像组学特征及动态变化，结合临床特征，构建并验证了2个单时间点模型、1个Delta模型和1个临床模型，用于预测2年内KOA的发生。结果显示，影像组学模型预测效能良好，其中Delta模型最优。

临床模型预测效能较低(AUC约0.59)，与已知高危因素(年龄>40岁、女性、超重/肥胖、膝损伤史)相一致，但因KOA机制复杂、个体异质性大，单独临床模型可靠性有限。

目前KOA诊疗存在局限性，在疾病发生前关节已有细微变化，肉眼难以识别且主观性强[14]。影像组学可高通量提取细微特征，不依赖医师经验，可重复性高[15-16]。本研究基于髌骨MRI的单一时间点模型预测性能良好，可辅助早期干预；Delta模型关注特征随时间变化，性能更优，提示定期随访价值。

已有研究利用胫股骨MRI或X线建立KOA诊断、分级、预后模型[17-19]，但较少关注髌骨及多时间点特征。髌骨形态、位置、纹理异常与KOA相关：髌骨形状变异、力线不良可致软骨变薄、骨赘形成。本研究建立了基于髌骨MRI图像的KOA预测模型，且预测效能良好，表明髌骨的影像学特征与KOA的发生具有一定相关性，与以往的研究结果相一致。影像组学前景广阔，仍需提升可重复性与可解释性。

本项研究存在一些局限性。首先，本研究仅使用髌骨的影像组学特征建立模型，预测能力可能有一定的限制，应在后续研究中纳入更多的膝关节组成结构。其次，本研究仅使用了OAI数据库，在后续的研究中会加入独立的外部验证集进一步验证模型的预测效能，以提高模型的外推性。最后，本研究纳入的参与者多为欧美裔，后续研究中将纳入更多的国内的参与者，以开发具有普遍适用性的预测模型。

总之，基于髌骨MRI的影像组学模型能有效预测2年内KOA发生，助力临床早期干预，降低患病率、延缓疾病进展。

参考文献

[1]中华医学会物理医学与康复学分会,四川大学华西医院.中国膝骨关节炎康复治疗指南(2023版)[J].中国循证医学杂志,2024,24(01):1-14.

[2]MACRI E M,CULVENOR A G,ENGLUND M,et al.Importance of patellofemoral and tibiofemoral cartilage lesions on trajectory of self-reported outcomes in patients at high risk of knee OA:4-6 years follow-up of patients undergoing meniscal surgery[J].Osteoarthritis Cartilage,2021,29(9):1291-1295.

[3]LANKHORST N E,DAMEN J,OEI E H,et al.Incidence,prevalence,natural course and prognosis of patellofemoral osteoarthritis:the Cohort Hip and Cohort Knee study[J].Osteoarthritis Cartilage,2017,25(5):647-653.

[4]中华医学会骨科学分会关节外科学组,中国医师协会骨科医师分会骨关节炎学组,湘雅医院国家老年疾病临床医学研究中心,等.中国骨关节炎诊疗指南(2021年版)[J].中华骨科杂志,2021,41(18):1291-1314.

[5]董玉香,潘艳丽,连晓琳.老年膝关节骨性关节炎患者自我效能水平的影响因素及护理干预[J].罕少疾病杂志,2023,3(30):101-103.

[6]KOLASINSKI S L,NEOGI T,HOCHBERG M C,et al.2019 American College of Rheumatology/Arthritis foundation guideline for the management of osteoarthritis of the Hand, hip, and knee[J].Arthritis Care Res (Hoboken),2020,72(2):149-162.

[7]PICCOLO C L,MALLIO C A,VACCARINO F,et al.Imaging of knee osteoarthritis:a review of multimodal diagnostic approach[J].Quant Imaging Med Surg,2023,13(11):7582-7595.

[8]陈亚龙,肖新广,上官建伟.磁共振FLAIR-FS序列成像在诊断早期膝关节滑膜炎中的应用研究[J].罕少疾病杂志,2024,4(31):92-94.

[9]LAMBIN P,RIOS-VELAZQUEZ E,LEIJENAAR R,et al.Radiomics:extracting more information from medical images using advanced feature analysis[J].Eur J Cancer,2012,48(4):441-446.

[10]NARDONE V,REGINELLI A,RUBINI D,et al.Delta radiomics:an updated systematic review[J].Radiol Med,2024,129(8):1197-1214.

[11]余伟杰,刘爱峰,陈继鑫,等.影像组学在膝关节骨性关节炎诊疗中的研究进展[J].放射学实践,2024,39(9):1254-1258.

[12]钟京谕,姚伟武.人工智能在骨关节炎影像诊断中的研究现状与进展[J].中华放射学杂志,2019,53(9):790-793.

[13]PETERFY C G,SCHNEIDER E,NEVITT M.The osteoarthritis initiative:report on the design rationale for the magnetic resonance imaging protocol for the knee[J].Osteoarthritis Cartilage,2008,16(12):1433-1441.

[14]REICHENBACH S,GUERMAZI A,NIU J,et al.Prevalence of bone attrition on knee radiographs and MRI in a community-based cohort[J].Osteoarthritis Cartilage,2008,16(9):1005-1010.

[15]HU J,ZHENG C,YU Q,et al.DeepKOA:a deep-learning model for predicting progression in knee osteoarthritis using multimodal magnetic resonance images from the osteoarthritis initiative[J].Quant Imaging Med Surg,2023,13(8):4852-4866.

[16]MAHENDRAKAR P,KUMAR D,PATIL U.Comprehensive study on scoring and grading systems for predicting the severity of knee Oosteoarthritis[J].Curr Rheumatol Rev,2024,20(2):133-156.

[17]LI W,LIU J,XIAO Z,et al.Automatic grading of knee osteoarthritis with a plain radiograph radiomics model: combining anteroposterior and lateral images[J].Insights Imaging,2024,15(1):143.

[18]LI S,CAO P,LI J,et al.Integrating radiomics and neural networks for knee osteoarthritis incidence prediction[J].Arthritis Rheumatol,2024,76(9):1377-1386.

[19]XUE Z,WANG L,SUN Q,et al.Radiomics analysis using MR imaging of subchondral bone for identification of knee osteoarthritis[J].J Orthop Surg Res,2022,17(1):414.

(收稿日期：2024-12-01)
(校对：翁佳鸿　排版：张鸿燊)