

晚期膝骨关节炎患者全膝关节置换术后股骨假体矢状位角度误差的影响因素分析

白毅¹, 聂晓英¹, 徐翔², 徐静^{3*}

¹内蒙古医科大学第二附属医院康复医学科, 内蒙古呼和浩特 010020; ²内蒙古医科大学第二附属医院脊柱外科C区, 内蒙古呼和浩特 010020; ³北京大学肿瘤医院内蒙古医院淋巴瘤血液科, 内蒙古呼和浩特 010000

[中图分类号] R687.4² [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.1610.2025.1224

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 白毅, 聂晓英, 徐翔, 等. 晚期膝骨关节炎患者全膝关节置换术后股骨假体矢状位角度误差的影响因素分析[J]. 解放军医学杂志, 2026, 51(3): 363-371.

[收稿日期] 2025-08-05 [录用日期] 2025-09-01 [上线日期] 2025-12-24

[摘要] **目的** 探究晚期膝骨关节炎患者全膝关节置换术(TKA)后股骨假体矢状位角度误差的影响因素。**方法** 回顾性收集2021年6月—2024年6月于内蒙古医科大学第二附属医院行TKA的晚期膝骨关节炎患者120例作为研究对象;按照4:1的比例,采用分层随机抽样法分为训练集($n=96$)与测试集($n=24$);根据术后6个月全长片矢状位股骨假体屈曲角(FPPA)将训练集分为力线良好组($n=42$)与力线不良组($n=54$)。比较两组临床资料、围手术期指标及术后不同时间点影像学参数。采用重复测量的方差分析评估不同时间点术后股骨影像学参数的变化趋势,并分析时间与组别的交互效应。在训练集中通过逻辑回归、K最近邻、支持向量机、朴素贝叶斯、多层感知器及极端梯度提升(XGBoost)6种机器学习算法构建晚期膝骨关节炎患者TKA术后股骨假体矢状位角度误差的预测模型,评估并比较6种机器学习模型的性能。通过R软件绘制摘要图、特征依赖图,对所构建的机器学习模型进行解释。采用多元线性回归分析FPPA与各影响因素的关系。**结果** 与力线良好组比较,力线不良组视觉模拟评分法评分、全血高切黏度、全血低切黏度、血浆黏度、红细胞(RBC)聚集指数及纤维蛋白原、D-二聚体水平增高,住院时间延长,美国特种外科医院评分、活动度、RBC变形指数降低,凝血酶原时间(PT)、活化部分凝血活酶时间(APTT)缩短($P<0.05$)。与术后1个月比较,力线不良组术后3、6个月股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角增大($P<0.05$);与术后3个月比较,力线不良组术后6个月上述三个指标也增大($P<0.05$);与力线良好组比较,力线不良组术后3、6个月股骨前弓角及术后6个月股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角增大($P<0.05$)。5折交叉验证的随机森林递归特征消除法筛选出7个危险因素的最佳候选变量,即活动度、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角。最终确定XGBoost模型为预测术后股骨假体矢状位角度误差的最佳机器学习模型,敏感度为0.845(95%CI 0.789~0.892),特异度为0.801(95%CI 0.754~0.863),准确度为0.814(95%CI 0.762~0.885),ROC-AUC为0.812(95%CI 0.765~0.864)。SHAP摘要图显示,对力线不良影响较为显著的危险因素依次为股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨侧弯角。SHAP值特征依赖图显示,随着股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数增加,活动度降低,PT、APTT缩短,力线不良的风险的趋势逐渐增加。多元线性回归分析结果显示,股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、股骨侧弯角是影响术后6个月全长片矢状位FPPA变化的独立危险因素($P<0.05$),活动度、PT、APTT是其独立保护因素($P<0.05$)。**结论** 股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、股骨侧弯角、活动度、PT、APTT是晚期膝骨关节炎患者TKA术后股骨假体矢状位角度误差的影响因素。

[关键词] 晚期膝骨关节炎;全膝关节置换术;股骨假体;矢状位角度误差

Factors influencing sagittal angle error of the femoral prosthesis following total knee arthroplasty in patients with advanced knee osteoarthritis

Bai Yi¹, Nie Xiao-Ying¹, Xu Xiang², Xu Jing^{3*}

¹Department of Rehabilitation Medicine, ²C Area of Spinal Surgery, the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical

[基金项目] 内蒙古自治区科技计划(2021GG0174)

[作者简介] 白毅, 硕士研究生, 主要从事骨关节术后康复治疗、线粒体氧化应激损伤方面的研究

[通信作者] 徐静, E-mail: zgjzcbg596488@126.com

University, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China

³Department of Lymphoma Hematology, Inner Mongolia Hospital of Peking University Cancer Hospital, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China

*Corresponding author, E-mail: zgjzcbg596488@126.com

This work was supported by the Science and Technology Program of Inner Mongolia Autonomous Region (2021GG0174)

[Abstract] Objective To explore the factors influencing sagittal angle error of the femoral component following total knee arthroplasty (TKA) in patients with advanced knee osteoarthritis. **Methods** This retrospective study enrolled 120 patients with advanced knee osteoarthritis who underwent TKA in the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University from June 2021 to June 2024. Using a 4:1 ratio, patients were divided into a training set ($n=96$) and a test set ($n=24$) via stratified random sampling. Based on the sagittal femoral prosthesis flexion angle (FPFA) on the full-length radiograph at 6 months postoperatively, patients in training set were categorized into well-aligned group ($n=42$) and malaligned group ($n=54$). Clinical data, perioperative indicators and imaging parameters at different postoperative time points were compared between the two groups. Repeated measures analysis of variance was used to evaluate the trend of postoperative femoral radiographic parameters at different time points, and to analyze the time-group interaction effect. Six machine learning algorithms, including logistic regression, K-nearest neighbor, support vector machine, naive Bayes, multilayer perceptron, and extreme gradient boosting (XGBoost), were employed in training set to construct prediction models for sagittal angle error of femoral prosthesis after TKA. The performance of 6 machine learning models was evaluated and compared. Summary plots and feature dependence plots were drawn using R software to interpret the constructed machine learning models. Multiple linear regression analysis was used to analyze the relationship between FPFA and various influencing factors. **Results** Compared with well-aligned group, malaligned group had higher visual analogue scale score, whole blood high-shear viscosity, whole blood low-shear viscosity, plasma viscosity, red blood cell (RBC) aggregation index, fibrinogen and D-dimer levels, as well as a longer hospital stay. Conversely, the Hospital for Special Surgery score, range of motion, and RBC deformation index were significantly lower, while prothrombin time (PT) and activated partial thromboplastin time (APTT) were shorter ($P<0.05$). Compared with the values at 1 month postoperatively, the anterior femoral bowing angle, femoral lateral bending angle, and lateral angle of the femoral mechanical axis were increased in malaligned group at 3 and 6 months postoperatively ($P<0.05$); compared with 3 months postoperatively, these three angles were further increased in the malaligned group at 6 months postoperatively ($P<0.05$). Compared with well-aligned group, malaligned group showed a larger anterior femoral bowing angle at both 3 and 6 months postoperatively, and larger femoral lateral bending angle and lateral femoral mechanical axis angle at 6 months postoperatively ($P<0.05$). Recursive feature elimination with 5-fold cross-validation identified 7 optimal candidate variables for risk factors, namely ROM, RBC aggregation index, PT, APTT, anterior femoral bowing angle, femoral lateral bending angle, and lateral femoral mechanical axis angle. Finally, the XGBoost model was determined as the best machine learning model for predicting postoperative sagittal angle error of the femoral prosthesis, with a sensitivity of 0.845(95%CI 0.789-0.892), specificity of 0.801(95%CI 0.754-0.863), accuracy of 0.814(95%CI 0.762-0.885), and ROC-AUC of 0.812(95%CI 0.765-0.864). The SHAP summary plot showed that the candidate variables with significant effects on malalignment were, in order, anterior femoral bowing angle, ROM, lateral femoral mechanical axis angle, RBC aggregation index, PT, APTT, and femoral lateral bending angle. Analysis of the feature dependence plots of the top 6 SHAP values revealed that the risk of malalignment gradually increased with the increase of anterior femoral bowing angle, lateral femoral mechanical axis angle, and RBC aggregation index, the decrease of ROM, and the shortening of PT and APTT. The results of multiple linear regression analysis showed that anterior femoral bowing angle, lateral femoral mechanical axis angle, RBC aggregation index, and femoral lateral curve angle were independent risk factors for changes in sagittal FPFA on the full-length radiograph at 6 months postoperatively, while ROM, PT, and APTT were independent protective factors ($P<0.05$). **Conclusion** Anterior femoral bowing angle, lateral femoral mechanical axis angle, RBC aggregation index, femoral bending angle, ROM, PT, and APTT are influencing factors for sagittal angle error of the femoral prosthesis after TKA in patients with advanced knee osteoarthritis.

[Key words] advanced knee osteoarthritis; total knee arthroplasty; femoral prosthesis; sagittal angle error

膝骨关节炎在老年人群中发病率较高^[1-2]；晚期患者常出现持续性关节疼痛、严重功能障碍^[3]，传统治疗往往难以取得理想效果，全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)是临床治疗晚期膝骨关节炎的有效手段^[4-5]。股骨假体作为TKA手术中的重要组成部分，其矢状位角度的准确性直接影响假体

的受力分布、关节稳定性以及患者的术后康复效果^[6-7]。不恰当的股骨假体矢状位角度可能导致假体松动、磨损加速、关节活动受限、髌股关节并发症等不良后果，进而影响手术远期疗效和假体使用寿命^[8]。因此，深入研究股骨假体矢状位角度误差的影响因素，对于提高TKA手术质量、改善患者预后

具有重要的理论和实际意义。基于此,本研究全面探讨晚期膝骨关节炎患者TKA术后股骨假体矢状位角度误差的影响因素,以期为临床医师优化手术方案提供理论依据,提高假体植入精准度,降低术后并发症发生率,进而提升TKA的整体疗效,改善患者预后与生活质量。

1 资料与方法

1.1 研究对象 收集2021年6月—2024年6月于内蒙古医科大学第二附属医院行TKA的晚期膝骨关节炎患者120例作为研究对象进行回顾性研究,其中男67例,女53例,年龄60~75(67.5 ± 5.6)岁。纳入标准:(1)明确诊断为晚期膝骨关节炎^[9];(2)单侧病变;(3)行TKA;(4)临床资料及影像学资料完整;(5)随访时间 ≥ 6 个月。排除标准:(1)合并其他严重膝关节疾病;(2)神经肌肉疾病;(3)既往膝关节手术史;(4)精神疾病或认知障碍。按照4:1的比例,采用分层随机抽样法将120例患者分为训练集($n=96$)与测试集($n=24$)。在术后膝关节侧位片上测量矢状位股骨假体屈曲角(femoral prosthesis flexion angle, FPFA;图1A)。根据术后6个月全长片矢状位FPFA将训练集中患者分为力线不良组($FPFA>3^\circ$ 或 $<-3^\circ$, $n=54$)及力线良好组($-3^\circ\leq FPFA\leq 3^\circ$, $n=42$)。本研究获内蒙古医科大学医学伦理委员会审批(YKD202002055)。

1.2 研究方法

1.2.1 基线资料收集 收集患者临床资料包括性别、年龄、体重指数(body mass index, BMI)、病程、合并基础疾病、手术部位、术后并发症等。

术前采用美国特种外科医院(hospital for special surgery, HSS)膝关节评分系统评估膝关节功能;采用视觉模拟评分法(visual analogue scale, VAS)评估膝关节疼痛程度^[10]。使用量角器测量患者膝关节的屈伸活动度:患者取仰卧位或坐位,将量角器的轴心对准膝关节的轴心,固定臂与股骨纵轴平行,移动臂与胫骨纵轴平行,患者屈伸膝关节,读取量角器上显示的角度,得到膝关节屈伸活动度。

术前采集患者空腹静脉血,采用血液流变仪(HT-100A型,淄博恒拓分析仪器有限公司)检测全血高切黏度、全血低切黏度、血浆黏度、红细胞(red blood cells, RBC)聚集指数、RBC变形指数;采用血液分析仪(JK-09型,日本岛津公司)检测凝血酶原时间(prothrombin time, PT)、活化部分凝血活酶时间(activated partial thromboplastin time, APTT)及纤维蛋白原(fibrinogen, FIB)、D-二聚体(D-dimer, D-D)水平。

1.2.2 围手术期指标收集 本研究患者后交叉韧带

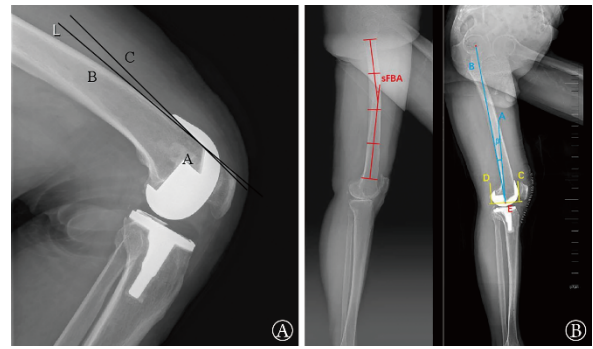


图1 股骨假体屈曲角(FPFA)影像学测量和矢状面术前术后影像

Fig.1 Femoral prosthesis flexion angle (FPFA) imaging measurement and anterior-posterior plane preoperative and postoperative images

A. FPFA影像学测量: A点为股骨假体内侧面与股骨皮质相交点,通过A点作与股骨前皮质切线即AB,股骨假体内切线AC,AB与AC夹角即为FPFA; B. 矢状面术前、术后影像: 股骨干在矢状面上被分为四等分,通过近端1/4节段的中线和通过远端1/4节段的中线之间的夹角定义为股骨矢状面弓形角(左); β 角定义为股骨上A线与B线之间的夹角, C线定义为在矢状面上垂直于股骨远端截骨线的股骨假体前髁切线, D线定义为在矢状面上垂直于股骨远端截骨线的股骨假体后髁切线, E点定义为股骨远端截骨线上位于C线与D线之间的中心点, A线定义为一条从E点起始的垂直于股骨远端截骨线的直线, B线为从股骨头中心至E点的连线(右)

功能均完好,优先选择保留后交叉韧带型(CR)假体以保留本体感觉。TKA术者均为高年资关节外科医师,均采用髓内定位联合间隙平衡技术。记录患者手术时间、切口长度、失血量、输血量、住院时间、术后首次下床活动时间。

1.2.3 影像学指标检测 分别于术后1、3、6个月拍摄下肢站立位全长片,导入PACS系统,通过Image-Pro Plus软件内置的校准工具,由两名研究者分别独立测量FPFA、股骨长度、股骨颈长度、股骨颈干角、股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角、下肢整体机械轴(hip-knee-ankle angle, HKA)、股骨远端外侧角(lateral distal femoral angle, LDFA)、胫骨近端内侧角(medial proximal tibial angle, MPTA)、胫骨假体后倾角(tibial component posterior slope, TCPS),取平均值,间隔2周进行第2次测量。股骨长度:冠状面股骨头最高点至股骨远端内侧踝最低位的距离;股骨颈长度:股骨头中点至股骨近端机械轴与股骨颈轴线交点的距离;股骨颈干角:股骨近端轴线与股骨颈轴线的夹角;股骨前弓角:股骨前方皮质上距离股骨远端5~10 cm点的连线与距离股骨近端10~15 cm点的连线的夹角;股骨侧弯角:股骨远端与近端轴线的夹角;股骨机械轴外侧角:膝关节水平线的上外侧与股骨机械轴的夹角; HKA:

髌关节中心—膝关节中心—踝关节中心三点连线的夹角；LDFA：股骨机械轴与股骨远端关节线之间的外侧夹角；MPTA：胫骨机械轴与胫骨近端关节线内侧的夹角；TCPS：胫骨假体平台面与胫骨纵轴在矢状面的夹角。典型病例见图1B。

1.3 统计学处理 采用SPSS 27.0软件进行统计分析。计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示，组间比较采用 t 检验；计数资料以例(%)表示，组间比较采用 χ^2 检验。采用Kappa分析评价两名研究者评价影像学参数的一致性，Kappa值 >0.70 为一致性较佳， >0.90 为一致性最佳。采用重复测量的方差分析，评估不同时间点术后股骨影像学参数的变化趋势，并分析时间与组别的交互效应。采用随机森林递归特征消除法(recursive feature elimination, RFE)及5折交叉验证对危险因素的候选变量进行筛选。训练集数据通过合成少数类过采样技术(synthetic minority over-sampling technique, SMOTE)进行预处理，以平衡正负类别，将少数类(股骨假体角度误差样本)与多数类(正常样本)的比例调整至1:4，最近邻数设为5，随机种子固定值设为42。在训练集中通过逻辑回归(logistic regression, LR；正则化参数=10，惩罚项=12)、K最近邻(K-nearest neighbors, KNN；邻居数=7，权重=distance，距离度量=eucledian)、支持向量机[support vector-machine, SVM；核函数=径向基函数(radial basis function, RBF)，正则化参数=100，RBF核参数=0.1]、朴素贝叶斯(naive Bayes, NB；模型类型=gaussian，平滑参数=0.01)、多层感知器(multilayer perceptron, MLP；隐藏=3，激活函数=relu，正则化参数=0.001)及极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost；学习率=0.05，最大深度=5，子采样=0.9，列采样=0.7，树的数量=300)6种机器学习算法构建预测模型；10折交叉验证的网格搜索方法来优化机器学习模型的超参数；评估并比较6种机器学习模型的性能。采用R软件绘制摘要图、特征依赖图，对所构建的机器学习模型进行解释。多元线性回归分析FPFA与各影响因素的关系。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 训练集与测试集临床资料比较 两集患者性别、年龄、BMI、病程、合并基础疾病、手术部位、术后并发症、HSS评分、VAS评分、膝关节屈伸活动度、血液流变学指标、凝血指标等临床资料比较，差异均无统计学意义($P>0.05$ ，附表1)。

2.2 两组临床资料比较 与力线良好组比较，力线不良组VAS评分、全血高切黏度、全血低切黏度、血浆黏度、RBC聚集指数、FIB水平、D-D水平增

高，HSS评分、膝关节屈伸活动度、RBC变形指数降低，PT、APTT缩短，差异均有统计学意义($P<0.001$)；两组性别、年龄等其他临床资料比较差异无统计学意义($P>0.05$ ，表1)。

2.3 两组围手术期指标比较 与力线良好组比较，力线不良组住院时间延长($P<0.05$)；两组手术时间、切口长度、失血量、输血量、术后首次下床活动时间比较差异均无统计学意义($P>0.05$ ，表2)。

2.4 影像学参数的一致性检验 Kappa分析结果显示，两名研究者测量数据的一致性较好，数据可信度高(Kappa值 >0.8 ，ICC值 >0.8 ，表3)。

2.5 两组影像学参数的重复测量方差分析结果 对两组术后1、3、6个月的影像学参数的分析结果显示，股骨长度、股骨颈长度、股骨颈干角、HKA、TCPS的时间效应、组间效应、交互效应差异的两组间差异均无统计学意义($P<0.05$)；LDFA和MPTA的时间效应无统计学意义($P>0.05$)，组间效应、交互效应差异有统计学意义($P<0.05$)；股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角的时间效应、组间效应、交互效应差异均有统计学意义($P<0.05$)；时间对股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角的影响随着术后股骨假体矢状位角度误差的不同而有所不同(表4、附图1)。

2.6 两组术后不同时间点影像学参数比较 与术后1个月比较，力线不良组术后3、6个月股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角以及术后6个月HKA、LDFA、MPTA、TCPS增加，差异有统计学意义($P<0.05$)；与术后3个月比较，力线不良组术后6个月股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角、HKA、LDFA、MPTA、TCPS增加，差异有统计学意义($P<0.05$)；与力线良好组比较，力线不良组术后3、6个月股骨前弓角以及术后6个月股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角、HKA、LDFA、MPTA、TCPS增加，差异有统计学意义($P<0.05$) (附表2)。

2.7 危险因素的候选变量筛选 采用RFE生成所有可能的危险因素的候选变量子集，5折交叉验证评估每个子集的泛化能力，最终确定7个最佳危险因素的候选变量，包括活动度、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角(附图2)。

2.8 各机器学习算法在测试集上的性能表现 XGBoost算法敏感度为0.845(95%CI 0.789~0.892)，特异度为0.801(95%CI 0.754~0.863)，准确度为0.814(95%CI 0.762~0.885)，F1分数为0.883(95%CI 0.836~0.932)，ROC-AUC为0.812(95%CI 0.765~0.864)，Brier评分为0.092，均优于LR、KNN、SVN、NB、MLP模型(附表3)，据此选择XGBoost模型为预测术后股骨假

表1 两组晚期膝骨关节炎患者的临床资料比较

Tab.1 Comparison of clinical data between two groups of patients with advanced knee osteoarthritis

项目	力线良好组(n=42)	力线不良组(n=54)	χ^2/t	P
性别[例(%)]			0.241	0.623
男	22(52.4)	31(57.4)		
女	20(47.6)	23(42.6)		
年龄(岁, $\bar{x}\pm s$)	66.4 \pm 5.9	68.2 \pm 5.5	1.489	0.140
BMI(kg/m ² , $\bar{x}\pm s$)	23.68 \pm 4.29	24.15 \pm 4.68	0.506	0.614
病程(年, $\bar{x}\pm s$)	8.64 \pm 1.06	8.92 \pm 1.11	1.250	0.214
合并基础疾病[例(%)]				
2型糖尿病	7(16.7)	11(20.4)	0.213	0.645
骨质疏松症	5(11.9)	8(14.8)	1.219	0.270
高血压	10(23.8)	15(27.8)	0.193	0.660
冠心病	5(11.9)	7(13.0)	0.024	0.876
高脂血症	6(14.3)	9(16.7)	0.102	0.750
手术部位[例(%)]			0.325	0.569
左膝	17(40.5)	25(46.3)		
右膝	25(59.5)	29(53.7)		
术后并发症[例(%)]				
感染	4(9.5)	6(11.1)	0.064	0.801
发热	12(28.6)	19(35.2)	0.473	0.492
深静脉血栓	5(11.9)	7(13.0)	0.024	0.876
心血管并发症	3(7.1)	5(9.3)	0.139	0.710
肺部感染	4(9.5)	7(13.0)	0.275	0.600
HSS评分(分, $\bar{x}\pm s$)	84.31 \pm 7.63	71.26 \pm 6.35	9.143	<0.001
VAS评分(分, $\bar{x}\pm s$)	3.05 \pm 0.24	3.87 \pm 0.32	13.846	<0.001
膝关节屈伸活动度($^{\circ}$, $\bar{x}\pm s$)	128.64 \pm 16.35	101.28 \pm 15.14	8.482	<0.001
血液流变学指标($\bar{x}\pm s$)				
全血高切黏度(mPa·s)	4.14 \pm 0.42	5.12 \pm 0.53	9.819	<0.001
全血低切黏度(mPa·s)	9.32 \pm 0.87	12.54 \pm 1.14	15.181	<0.001
血浆黏度(mPa·s)	1.34 \pm 0.21	1.75 \pm 0.28	7.912	<0.001
RBC聚集指数	2.57 \pm 0.18	3.31 \pm 0.29	14.498	<0.001
RBC变形指数	0.87 \pm 0.12	0.65 \pm 0.08	10.753	<0.001
凝血指标($\bar{x}\pm s$)				
PT(s)	41.21 \pm 6.86	28.58 \pm 5.12	10.331	<0.001
APTT(s)	72.34 \pm 6.64	61.45 \pm 5.28	8.954	<0.001
FIB(mg/dL)	295.31 \pm 22.38	334.62 \pm 28.51	7.345	<0.001
D-D(μ g/L)	342.62 \pm 30.16	423.75 \pm 36.95	11.546	<0.001

BMI. 体重指数; HSS. 特种外科医院; VAS. 视觉模拟评分法; RBC. 红细胞; PT. 凝血酶原时间; APTT. 活化部分凝血活酶时间; FIB. 纤维蛋白原; D-D. D-二聚体

体矢状位角度误差的最佳机器学习模型。

2.9 基于SHAP解释XGBoost模型

2.9.1 XGBoost模型特征变量SHAP摘要图

预测术后股骨假体矢状位角度误差的XGBoost模型特征变量SHAP摘要图(附图3)显示, 对行TKA的晚期膝骨关节炎患者术后发生股骨假体矢状位角度误差影响较为显著的危险因素的候选变量依次为股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、

APTT、股骨侧弯角。其中股骨前弓角是影响术后发生股骨假体矢状位角度误差最重要的危险因素的候选变量, 与股骨前弓角较小(蓝色)的患者相比, 股骨前弓角较大(粉色)的患者术后发生股骨假体矢状位角度误差的可能性较大。

2.9.2 分析SHAP值特征依赖图

分析前6位SHAP值特征依赖图显示, 股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、APTT对术后股

表2 两组晚期膝关节炎患者围手术期指标比较($\bar{x}\pm s$)Tab.2 Comparison of perioperative indicators between two groups of patients with advanced knee osteoarthritis ($\bar{x}\pm s$)

指标	力线良好组(n=42)	力线不良组(n=54)	t	P
手术时间(min)	88.47±11.26	93.31±15.85	1.676	0.097
切口长度(cm)	12.65±1.34	12.84±1.37	0.681	0.498
失血量(ml)	223.15±28.66	232.78±32.64	1.512	0.134
输血量(ml)	286.33±32.12	295.02±35.16	1.247	0.215
住院时间(d)	16.43±3.27	18.28±3.65	2.577	0.012
术后首次下床活动时间(h)	24.51±3.96	25.88±4.21	1.623	0.108

表3 影像学参数的一致性检验

Tab.3 Consistency test of imaging parameters

指标	Kappa值(95%CI)	ICC值(95%CI)
FPFA	0.931(0.863~0.966)	0.869(0.802~0.915)
股骨长度	0.802(0.786~0.885)	0.831(0.769~0.882)
股骨颈长度	0.951(0.863~0.994)	0.853(0.795~0.903)
股骨颈干角	0.863(0.802~0.948)	0.884(0.834~0.931)
股骨前弓角	0.905(0.825~0.953)	0.829(0.753~0.867)
股骨侧弯角	0.891(0.814~0.957)	0.808(0.769~0.855)
股骨机械轴外侧角	0.942(0.869~0.982)	0.822(0.748~0.859)
HKA	0.922(0.861~0.962)	0.861(0.788~0.904)
LDFA	0.916(0.843~0.955)	0.859(0.801~0.892)
MPTA	0.927(0.864~0.970)	0.836(0.771~0.885)
TCPS	0.904(0.828~0.941)	0.817(0.733~0.846)

FPFA. 股骨假体屈曲角; HKA. 下肢整体机械轴; LDFA. 股骨远端外侧角; MPTA. 胫骨近端内侧角; TCPS. 胫骨假体后倾角; ICC. 组内相关系数

表4 两组术后影像学参数的重复测量方差分析

Tab.4 Repeated-measures analysis of variance of postoperative imaging parameters in the two groups

指标	时间效应		组间效应		交互效应	
	F	P	F	P	F	P
股骨长度	0.029	1.000	0.501	0.618	0.015	0.513
股骨颈长度	3.143	0.272	0.350	0.727	1.100	0.198
股骨颈干角	1.221	0.558	0.721	0.473	0.880	0.264
股骨前弓角	33.346	0.030	4.309	<0.001	143.688	<0.001
股骨侧弯角	26.376	0.049	2.635	0.009	26.775	0.006
股骨机械轴外侧角	37.475	0.026	2.739	0.007	102.644	<0.001
HKA	2.299	0.352	1.259	0.211	2.816	0.187
LDFA	12.402	0.077	2.163	0.033	4.541	0.045
MPTA	16.941	0.057	2.211	0.029	5.158	0.036
TCPS	10.400	0.092	1.330	0.187	3.0212	0.122

HKA. 下肢整体机械轴; LDFA. 股骨远端外侧角; MPTA. 胫骨近端内侧角; TCPS. 胫骨假体后倾角

骨假体矢状位角度误差的影响均呈现出复杂的非线性关系。SHAP值与各危险因素候选变量的关系表明,随着股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数增加,活动度、PT、APTT降低,行TKA的

晚期膝关节炎患者术后发生股骨假体矢状位角度误差的风险呈增加趋势(附图4)。

进一步采用阈值效应分析显示,股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、APTT影响术后股骨假体矢状位角度误差的拐点分别为13.72°、113.25°、10.42°、2.99、34.11 s、66.21 s,即股骨前弓角 $\geq 13.72^\circ$ 、活动度 $\leq 113.25^\circ$ 、股骨机械轴外侧角 $\geq 10.42^\circ$ 、RBC聚集指数 ≥ 2.99 、PT ≤ 34.11 s、APTT ≤ 66.21 s的患者术后发生股骨假体矢状位角度误差的概率增加(附表4)。

2.10 分层交互分析性别对FPFA与各相关因素之间关系的影响 采用EmpowerStats软件中的分层交互检验作用对性别进行分析。男性和女性两个群体中FPFA与股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨侧弯角的关系均存在($P<0.05$),在经交互检验作用后,结果显示性别不能影响FPFA与各相关因素之间的关系($P_{交互}>0.05$,附表5)。

2.11 FPFA与各影响因素的多元线性回归分析 将股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨侧弯角作为自变量,术后6个月全长片矢状位FPFA的绝对值作为因变量(计量资料均按实际数值),纳入多元线性回归分析;结果显示,未校正模型中,随着股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、股骨侧弯角增加,活动度、PT、APTT降低,术后6个月全长片矢状位FPFA绝对值增加的风险上升($P<0.05$)。校正其他因素(HSS评分、VAS评分、膝关节屈伸活动度、全血高切黏度、全血低切黏度、血浆黏度、RBC变形指数、FIB水平、D-D水平)的影响后,股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、股骨侧弯角是影响术后6个月全长片矢状位FPFA变化的独立危险因素,活动度、PT、APTT是其独立保护因素($P<0.05$,附表6)。计算所有独立危险因素与保护因素的方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF),结果显示,股骨前弓角(VIF=3.164)、活动度(VIF=2.876)、股骨机械轴外侧角(VIF=3.265)、RBC聚集指数

(VIF=1.231)、PT(VIF=1.647)、APTT(VIF=1.539)、股骨侧弯角(VIF=3.211)所有指标的VIF值均<5,说明各变量间多重共线性不明显。

3 讨 论

晚期膝关节炎是一种以关节软骨破坏、骨质增生为主要病理特征的慢性退行性疾病,严重影响患者的生活质量^[1-2]。TKA通过植入人工关节假体可有效缓解疼痛、恢复关节功能^[4-5]。然而,手术效果不仅取决于假体的质量,假体的精准植入同样关键,其中股骨假体矢状位角度的准确性直接影响膝关节的生物力学性能、屈伸功能及假体使用寿命^[6,8]。

本研究中力线不良组较力线良好组VAS评分增高,HSS评分、活动度降低。这与股骨假体矢状位角度误差引发的异常生物力学负荷密切相关,当FPFA超出正常范围时,膝关节屈伸过程中应力分布失衡,假体-骨界面产生异常剪切力与压力,导致关节周围软组织持续受到牵拉、磨损,进而诱发疼痛并限制关节活动^[11]。此外,异常力线还可能加速假体周围的骨吸收与骨质重塑,造成假体微动甚至松动,影响术后功能恢复^[12]。相比之下,力线良好组假体植入角度符合膝关节生理力学特性,能够有效分散关节负荷,减轻软组织损伤,从而实现较低的疼痛水平与良好的关节功能恢复。本研究中力线不良组较力线良好组全血高切黏度、全血低切黏度、血浆黏度均增加。血液黏度的增加可能反映了力线不良状态下患者体内血液流变学特性的改变。一方面,股骨假体矢状位角度误差可能通过神经-体液调节机制影响血管内皮细胞功能,导致血管收缩、血液黏滞性增加;另一方面,异常的膝关节生物力学环境可能引发全身性的炎症反应,使血液中的炎症因子水平升高,进而影响RBC的聚集性和变形性,导致血液黏度上升。高黏度的血液在血管中流动阻力增大,可能导致膝关节周围组织的血液灌注不足,影响组织的营养供应和代谢产物的清除,不利于关节功能的恢复^[13-14]。本研究中力线不良组较力线良好组RBC聚集指数升高,RBC变形指数降低。RBC聚集指数的升高表明RBC在血液中更容易发生聚集,形成团块,进一步增加血液黏度,阻碍血液的正常流动;而RBC变形指数的降低则表明RBC的柔韧性下降,难以通过狭窄的毛细血管,导致微循环障碍^[15]。在膝关节置换术后,良好的微循环对于组织的修复和再生至关重要。骨组织的微循环以毛细血管网为主,血管直径细小,且TKA术中软组织剥离、骨膜损伤已对局部血流造成一定干扰。RBC聚集指数增加提示毛细血管进一步阻塞,使血流速度减慢甚至停滞,导致局部组织灌注压下降,氧和营

养物质输送受阻^[16];RBC变形指数降低直接减少有效灌注的毛细血管数量,导致骨-假体界面局部出现灌注盲区,加剧组织缺氧和代谢产物堆积。骨-假体界面的成骨细胞增殖、分化及骨基质合成需要有氧代谢支持。微循环障碍导致的局部缺氧会激活缺氧诱导因子,但持续低氧会抑制成骨细胞的成骨核心转录因子的表达,降低碱性磷酸酶的活性,导致新骨形成延迟;同时,缺氧会促进糖酵解增强,导致乳酸堆积和局部pH值下降(酸中毒),进一步抑制成骨细胞活性,甚至诱导其凋亡。TKA术后股骨假体的矢状位角度依赖于骨-假体界面的初始固定强度和长期骨整合质量,当微循环障碍导致骨整合不良时,界面稳定性受损,最终表现为矢状位角度误差增大。力线不良引起的RBC聚集和变形能力下降,可能影响膝关节周围组织的氧供和营养输送,延缓康复进程,甚至增加血栓形成的风险。本研究中力线不良组较力线良好组FIB、D-D水平增高,PT、APTT缩短。股骨假体矢状位角度误差可能通过影响血管内皮细胞功能、激活凝血系统等机制,导致血液凝固功能异常,增加深静脉血栓形成等并发症的发生概率,进一步影响患者的康复和预后^[17-18]。本研究中力线不良组较力线良好组住院时间延长。这可能是因为力线不良组患者术后关节周围软组织持续受到异常应力刺激,导致患者肌肉处于保护性痉挛状态,阻碍关节活动度训练的开展,使得康复进程显著滞后^[19]。

本研究发现,TKA术后随着时间推移,力线不良组股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角增大;力线不良组较力线良好组术后3、6个月股骨前弓角以及术后6个月股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角增大。这是因为股骨假体矢状位角度误差导致的力线不良,会改变膝关节的生物力学环境。正常膝关节在运动过程中,股骨承受着复杂而精确的应力分布;当力线不良时,应力不能均匀地传导至股骨,某些区域应力集中,而其他区域应力不足^[20]。这种异常的应力分布会刺激股骨的骨重建过程,为了适应新的应力环境,股骨可能会发生形态改变,导致股骨角度改变。此外力线不良还会增加假体与股骨之间的微动,微动产生的剪切力和摩擦力会对股骨骨组织产生不良影响,破坏骨-假体界面的稳定性。长期微动可能导致假体周围骨溶解,进一步影响股骨的力学性能和形态,为了重新建立力学平衡,股骨可能会发生适应性改变,表现为相关角度的增加^[21]。股骨前弓角、股骨侧弯角和股骨机械轴外侧角的增加会改变膝关节的正常解剖结构和生物力学关系,导致关节活动受限,患者可能出现屈伸活动范围减小、步态异常等问题,严重影响日常生活活

动能力,如行走、上下楼梯等。异常的股骨角度还会增加关节面的压力分布不均,导致关节软骨磨损加剧、骨赘形成等病理改变,从而引发或加重关节疼痛,疼痛的加剧会进一步影响患者的康复进程和生活质量^[22]。

本研究采用5折交叉验证的RFE筛选出7个最佳危险因素的候选变量:活动度、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角,涵盖了关节功能、血液流变学、凝血指标及股骨形态学参数,共同揭示了术后股骨假体矢状位角度误差的潜在影响机制。其中,股骨前弓角、股骨侧弯角、股骨机械轴外侧角作为直接反映股骨形态的参数,其数值变化与假体植入角度紧密相关^[23];活动度则体现了术后关节功能恢复状态,较低的活动度往往伴随肌肉萎缩、关节粘连等问题,可能影响膝关节屈伸位的精准调整,间接导致假体角度误差风险上升^[24];血液流变学及凝血指标的纳入,提示全身状态对手术精准性的潜在影响^[25]。RBC聚集指数升高反映血液黏滞度增加,可能引发微循环障碍,影响术区组织氧供,导致术者操作稳定性下降;PT、APTT缩短则表明机体处于高凝状态,增加术中血栓形成风险,迫使手术操作时间延长,进而降低假体植入精度。这些因素相互交织,共同构成了术后角度误差的风险网络。本研究最终选择XGBoost模型为预测术后股骨假体矢状位角度误差的最佳机器学习模型,特征变量SHAP摘要图显示,对行TKA的晚期膝骨关节炎患者术后发生股骨假体矢状位角度误差影响较为显著的危险因素的候选变量依次为股骨前弓角、活动度、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、PT、APTT、股骨侧弯角。股骨前弓角位列首位,凸显了股骨形态在假体植入精准度中的核心作用;活动度作为第二大影响因素,强调了术前关节功能状态的重要性,充分的术前康复训练以改善关节活动度,或可提升术中操作的灵活性与准确性。股骨机械轴外侧角与RBC聚集指数的影响权重紧随其后,股骨机械轴外侧角异常会改变下肢力线,导致假体定位偏差;而血液黏滞度增加可能影响术区组织的顺应性,干扰截骨操作的精准性。PT、APTT等凝血指标的纳入,提示围手术期血液管理对手术质量的间接影响,优化凝血状态或可成为降低角度误差的潜在干预方向。本研究分析前6位SHAP值特征依赖图呈现的趋势关系,为临床风险预警提供了直观依据,随着股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数增加,活动度降低,PT、APTT缩短,行TKA的晚期膝骨关节炎患者术后发生股骨假体矢状位角度误差的风险呈增加趋势。该结果提示临床医师需在术前进行多维度综合评估,

这些特征间的联动关系也为开发智能化预测模型提供了理论基础,通过整合多模态数据,可实现对术后角度误差风险的动态评估与个性化干预。本研究还发现,股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、股骨侧弯角是影响术后6个月全长片矢状位FPFA变化的独立危险因素,活动度、PT、APTT是独立保护因素;进一步明确了影响术后FPFA变化的独立因素,为临床实践提供了重要指导。对于存在股骨前弓角、股骨机械轴外侧角等解剖结构异常的患者,术前需通过详细的影像学评估制定个性化手术方案,必要时借助计算机导航、机器人辅助等先进技术提高假体植入精度。针对RBC聚集指数升高的患者,术前可进行血液流变学调节,改善血液状态,降低手术操作难度和术后并发症风险;而对于活动度良好、凝血功能正常的患者,应在术后加强康复指导,维持其优势条件,进一步促进假体稳定。

综上所述,股骨前弓角、股骨机械轴外侧角、RBC聚集指数、股骨侧弯角是晚期膝骨关节炎患者TKA术后股骨假体矢状位角度误差的独立危险因素,活动度、PT、APTT是其独立保护因素。本研究尚存在如下局限性:样本来源单一,数量较少,代表性不足,且仅以术后6个月的全长片矢状位FPFA进行分组和分析,随访时间相对较短。而TKA术后假体角度的变化可能是一个长期过程,随着时间推移,假体的磨损、骨质重塑以及患者生活方式的改变等,都可能导致股骨假体矢状位角度发生进一步变化。较短的随访时间可能无法捕捉到这些长期变化,影响对角度误差影响因素的全面认识。未来研究将进一步纳入多中心样本,扩大样本容量,增加样本的多样性和代表性,并建立长期(术后1年、3年或更长时间)随访机制,定期采集全长片及相关临床数据,动态监测股骨假体矢状位角度的变化情况。通过长期随访数据的分析,能够更全面地了解角度误差的发展趋势,以及各影响因素在不同时间阶段的作用差异,为临床提供更具参考价值的信息。

【附加材料】

附表1—6和附图1—4见<https://dx.doi.org/10.11855/j.issn.0577-7402.1610.2025.1224FJ>。

请扫描右方二维码获取。



【参考文献】

- [1] Dong Y, Yan Y, Zhou J, et al. Evidence on risk factors for knee osteoarthritis in middle-older aged: a systematic review and meta analysis[J]. J Orthop Surg Res, 2023, 18(1): 634.
- [2] 朱博文,朱清广,房敏.老年人膝骨关节炎本体感觉的特征概况及治疗策略[J].中华老年医学杂志, 2024, 43(10): 1357-1361.

- [3] 邵云博, 郭珈宜, 李峰, 等. 膝关节炎患者下肢表面肌电信号特征及其运动康复的研究进展[J]. 医学新知, 2024, 34(8): 927-935.
- [4] Tampere T, Arnout N, Victor J. Total knee arthroplasty: the need for better patient selection[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2025, 33(3): 784-788.
- [5] Rosenberg N. Walking ability after total knee arthroplasty: a comprehensive review[J]. *Cureus*, 2025, 17(2): 79577.
- [6] Farooq H, Deckard ER, Carlson J, et al. Coronal and sagittal component position in contemporary total knee arthroplasty: Targeting native alignment optimizes clinical outcomes[J]. *J Arthroplasty*, 2023, 38(2): 245-251.
- [7] 于海涛, 吴昊越, 张浩强, 等. 人工智能在膝关节炎诊疗中的应用进展[J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(1): 9-15.
- [8] 吴浩, 潘利平, 刘恒, 等. 胫骨假体的不同后倾角度对内侧间室单髁置换术后膝关节功能的影响[J]. 北京大学学报(医学版), 2021, 53(5): 877-882.
- [9] 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, 国家老年疾病临床医学研究中心(湘雅医院), 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.
- [10] Jiang Y, Liu C, Zhang Q, et al. Restoring coronal pre-arthritic alignment in mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty: mid- to long-term outcomes[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2025, 26(1): 124.
- [11] Kong L, Lin W, Kang H, et al. The effect of femoral prosthesis design on patellofemoral contact stresses in total knee arthroplasty: a case-control study with mid-term follow-up minimum 3-year follow-up[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 781.
- [12] 李超, 季明亮, 王善正, 等. 全膝关节置换术治疗膝外翻的矫正程度对临床疗效的影响[J]. 中华外科杂志, 2021, 59(12): 1005-1011.
- [13] 曹云平, 徐士刚. 新型L型钢板与传统锁定钢板内固定术对老年胫骨平台骨折患者膝关节功能, 炎症因子及血液流变学的影响[J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(22): 4963-4966.
- [14] 唐承杰, 刘晶晶, 李峰. 七味三七口服液联合持续被动运动仪对全膝置换术后膝关节功能及血液流变学的影响[J]. 中国老年学杂志, 2022, 42(3): 601-604.
- [15] Baskurt OK, Meiselman HJ. Blood rheology and hemodynamics[J]. *Semin Thromb Hemost*, 2024, 50(6): 902-915.
- [16] 陈玉萍, 文映红, 祁云. 利伐沙班抗凝治疗对人工膝关节置换术后下肢深静脉血栓形成的影响[J]. 解放军医学杂志, 2024, 49(11): 1302-1310.
- [17] Balato G, Ascione T, Festa E, et al. The combined evaluation of fibrinogen and D-dimer levels are a helpful tool to exclude periprosthetic knee infection[J]. *J Orthop Res*, 2023, 41(8): 1840-1847.
- [18] Ma Q, Sun CJ, Wu S, et al. Comparison of blood loss between open-box prosthesis and closed-box prosthesis after primary total knee arthroplasty[J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(3): 768-777.
- [19] Calderone A, Mazzurco Masi VM, De Luca R, et al. The impact of biofeedback in enhancing chronic pain rehabilitation: a systematic review of mechanisms and outcomes[J]. *Heliyon*, 2025, 11(2): 41917.
- [20] Ito S, Igawa T, Iijima S, et al. Effects of walking aids on knee adduction moment after total knee arthroplasty: a gait analysis study[J]. *Cureus*, 2025, 17(3): 80828.
- [21] Yang H, Marras D, Clary CW, et al. Impact of surgical alignment, bone properties, anterior-posterior translation, and implant design factors on fixation in cementless unicompartmental knee arthroplasty[J]. *J Biomech Eng*, 2025, 147(1): 011007.
- [22] Eltayeb HH, El-Adwar KL, Ahmed AA, et al. Femoral head reduction osteotomy for the treatment of late sequela of Legg-Calvé-Perthes disease and Perthes-like femoral head deformities[J]. *J Pediatr Orthop B*, 2024, 33(4): 348-357.
- [23] 张扬, 王大赛, 王强. 首次全髋关节置换后股骨柄尖端与股骨远端皮质撞击的危险因素[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(27): 4339-4343.
- [24] Anjiki K, Hiranaka T, Tanaka T, et al. Prediction of postoperative range of motion after mobile-bearing medial unicompartmental knee arthroplasty from the preoperative range of motion and other preoperative factors[J]. *J Knee Surg*, 2024, 37(9): 687-692.
- [25] 马爽, 王驰, 崔岩. 间歇性气压治疗联合仿生生物电治疗预防人工髋关节置换术后深静脉血栓形成的疗效[J]. 中国医科大学学报, 2023, 52(4): 357-360.

(责任编辑: 纪方方)