doi:10.11659/jjssx.10E024013

·骨关节专栏·

膝关节软骨厚度预测模型构建的可行性研究

程治铭[1,2],许中华[1],满孝军[1],李玉恒[1,3],刘载阳[1],张 瑗[1] (1.陆军军医大学第二附属医院骨科关节疾病与运动医学部,重庆 400037;2.解放军联勤保障部队第964医院骨科,吉林 长春 130062;3.陆军军医大学生物医学工程与影像医学系,重庆 400038)

[摘 要] **目的** 采用不同方法测定膝关节软骨厚度,探讨数据集数学统计模型预测软骨厚度的可行性。**方法** 选取2023年3月至2024年3月于陆军军医大学第二附属医院诊断为膝关节骨关节炎(OA)合并内翻畸形、并实施单侧全膝关节置换术的304例患者纳入研究,患者手术前后临床资料齐全。选择患者股骨远端外髁、外侧胫骨平台、股骨后内髁和股骨后外髁4个解剖学部位的健康软骨,基于术前MRI分析、机器人导航系统示踪、手术标本组织切片和电子标尺测定膝关节软骨厚度。收集患者人口学、疾病学和影像学基线指标构建数据集,并建立膝关节软骨厚度线性回归分析、主成分分析、最小绝对收缩和选择算子(*LASSO*)回归分析和*K*-最近邻算法(*KNN*)模型,用以预测软骨厚度的准确度(*accuracy*)、决定系数(R^2)和均方根误差(*RMSE*),并建立可预测软骨厚度的回归方程。**结果** 术前MRI分析、机器人导航系统示踪和手术标本组织切片测得的膝关节软骨厚度与电子标尺结果比较差异均无统计学意义($P>0.05$)。线性回归模型、主成分分析模型、*LASSO*回归模型对膝关节软骨厚度的预测效率均未达到预期($R^2<0.3$,$RMSE>0.03$)。*KNN*模型对于股骨远端外髁和外侧胫骨平台软骨厚度的预测效果不理想($R^2=0.23$,$RMSE=0.29$),但存在潜在可预测价值($accuracy=0.21$,$accuracy=0.15$)。**结论** 基于个体参数的膝关节软骨厚度型预测模具有一定科学性,*KNN*模型的可行性较高。但因样本量不足、个体参数权重不清等原因,四种预测模型的效能不太理想,未能提供确定的预测方程,因此预测模型构建方案尚待进一步优化。

[关键词] 骨关节炎;膝关节;软骨厚度;机器人手术;回归分析;预测模型

[中图分类号] R684.3;R318.01 [文献标志码] A [收稿日期] 2024-10-08

[基金项目] 国家卫生健康委科学技术研究所重大项目(2023HX002108);重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0174);重庆市中青年高端医学人才工作室项目(2022-15)

[通信作者] 张 瑗,E-mail:zhangyuan@tmmu.edu.cn

[5] 余 敏,丑 克,李雨佳.全内技术重建前交叉韧带临床效果观察[J].中国现代手术学杂志,2022,26(2):108-113.doi:10.16260/j.cnki.1009-2188.2022.02.006.

[6] 徐忠建,蒋 旭,张智鹏,等.透视辅助韧带重建术对前交叉韧带损伤患者膝关节功能及稳定性的影响[J].实用临床医药杂志,2023,27(6):24-28.doi:10.7619/jcmp.20223570.

[7] 严 方,周 璞,文 顺,等.关节镜下双束解剖重建术对膝关节前交叉韧带损伤患者膝关节稳定性的影响[J].上海医药,2023,44(13):39-43.doi:10.3969/j.issn.1006-1533.2023.13.012.

[8] 郑守超,石 晶,王 峰,等.关节镜下半月板成形术治疗膝关节半月板损伤患者的效果观察及对Lysholm评分、关节生理功能的影响[J].解放军医药杂志,2021,33(3):82-86.doi:10.3969/j.issn.2095-140X.2021.03.018.

[9] 孙鹏霄,朱庆生,方 庆,等.关节镜下"内-外"缝合法和"全内"缝合法在膝关节外侧盘状半月板损伤治疗中的应用[J].海南医学,2023,34(24):3573-3577.doi:10.3969/j.issn.1003-6350.2023.24.016.

[10] 张丹妹,冯志军,赵艳丽,等.军事训练导致膝关节前交叉韧带损伤的流行病学调查[J].中国骨与关节损伤杂志,2023,38(8):846-848.doi:10.7531/j.issn.1672-9935.2023.08.014.

[11] Petersen W,Guenther D,Imhoff AB,et al.Management after acute rupture of the anterior cruciate ligament (ACL).Part 1:ACL reconstruction has a protective effect on secondary meniscus and cartilage lesions[J].Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc,2023,31(5):1665-1674.doi:10.1007/s00167-022-06960-1.

[12] 张 怡,谷媛媛,曲径直,等.体外冲击波疗法联合下肢肌力训练对关节镜下前交叉韧带重建术后患者关节稳定性活动度及平衡功能的影响[J].河北医学,2023,29(4):587-591.doi:10.3969/j.issn.1006-6233.2023.04.012.

[13] 徐 畅,马殿栋,唐子滨.自体半腱肌混编LARS人工韧带优化点与等长点重建在治疗中老年前交叉韧带损伤中的比较[J].中国老年学杂志,2023,43(6):1347-1350.doi:10.3969/j.issn.1005-9202.2023.06.018.

[14] 王玉聪,徐 涛,顾春晓,等.微创后内侧取腱结合"全内"技术在老年膝前交叉韧带重建中的应用[J].老年医学与保健,2023,29(6):1338-1342.doi:10.3969/j.issn.1008-8296.2023.06.047.

[15] 尹合勇,郭 艾,马立峰,等.关节镜下全内技术半腱肌重建前交叉韧带的近期临床随访观察[J].临床和实验医学杂志,2022,21(11):1185-1188.doi:10.3969/j.issn.1671-4695.2022.11.018.

[16] 肖 健,李 浩,闫 君,等.关节镜下全内重建治疗孤立性后十字韧带损伤[J].中华骨科杂志,2024,44(3):139-145.doi:10.3760/cma.j.cn121113-20230919-00182.

[17] 鲍宏玮,王黎平,林 洁,等.全内技术双悬吊固定在军人前交叉韧带重建中的应用及疗效分析[J].海军医学杂志,2020,41(6):652-654.doi:10.3969/j.issn.1009-0754.2020.06.010.

[18] 曾 浩,胡 勇,彭 晋,等.关节镜下可调节袢钢板全内技术重建前交叉韧带的临床疗效分析[J].中国内镜杂志,2022,28(3):1-7.doi:10.12235/E20210344.

[19] 张贵民,崔智慧,陈明梁.稳定型内侧半月板ramp损伤采用全内缝合修复手术对关节活动度和愈合效果的影响[J].中国临床医生杂志,2020,48(5):596-598.doi:10.3969/j.issn.2095-8552.2020.05.028.

[20] 李智尧,郭 艾,马立峰,等.关节镜下全内技术重建后交叉韧带的临床疗效[J].临床和实验医学杂志,2020,19(17):1856-1860.doi:10.3969/j.issn.1671-4695.2020.17.021.

(编辑:刘 艺)

Feasibility study on the construction of predictive models of knee joint cartilage thickness

CHENG Zhi-ming[1,2], XU Zhong-hua[1], MAN Xiao-jun[1], LI Yu-heng[1,3], LIU Zai-yang[1], ZHANG Yuan[1] (1. Joint Diseases and Sports Medicine Center, Department of Orthopedics, the Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China; 2. Department of Orthopedics, 964th Hospital of Joint Logistics Support Force of PLA, Changchun Jilin 130062, China; 3. Department of Biomedical Engineering and Medical Imaging, Army Medical University, Chongqing 400038, China)

Abstract: Objective To determine the knee joint cartilage thickness using different methods and explore the feasibility of mathematical statistical models of dataset for the prediction of cartilage thickness. **Methods** A total of 304 patients diagnosed as knee osteoarthritis (OA) combined with varus deformity and undergoing unilateral total knee arthroplasty at the Second Affiliated Hospital of Army Medical University from March 2023 to March 2024 were selected for the study. All patients had complete preoperative and postoperative clinical data. The healthy cartilage at four anatomical sites of patients, including the distal femur lateral condyle, lateral tibial plateau, posterior medial femoral condyle, and posterior lateral femoral condyle were selected, and the knee joint cartilage thickness was determined based on preoperative MRI analysis, robotic navigation system tracing, tissue section of surgical specimen and digital vernier caliper. The baseline indicators of demographics, disease and imaging ffor patients were collected to construct a dataset, and four models of linear regression analysis, principal component analysis, *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* (*LASSO*) regression analysis, and *K-nearest neighbors* (*KNN*) analysis were established for predicting the accuracy, determination coefficient (R^2) and *root mean square error* (*RMSE*), and the regression equation for predicting cartilage thickness was established. **Results** The knee joint cartilage thicknesses determined by preoperative MRI analysis, robotic navigation system tracing, tissue section of surgical specimen had no statistically significant difference with that by digital vernier caliper (P>0.05). The predictive efficiencies of models of linear regression analysis, principal component analysis, and *LASSO* regression analysis for the knee joint cartilage thickness all failed to meet the expectations (R^2<0.3, *RMSE*>0.03). The predictive effect of *KNN* model on the cartilage thickness of the distal femur lateral condyle and lateral tibial plateau was not ideal (R^2=0.23, *RMSE*=0.29), while it had potential predictive value (*accuracy*=0.21, *accuracy*=0.15). **Conclusion** The prediction model of knee joint cartilage thickness based on individual parameters has certain scientificity, and the feasibility of *KNN* model is relatively high. However, due to insufficient sample size and unclear individual parameter weight, the efficiencies of the four established prediction models are not ideal, which fails to provide definite prediction equations. Therefore, the construction scheme of the prediction model still needs to be further optimized.

Keywords: osteoarthritis; knee joint; cartilage thickness; robotic surgery; regression analysis

膝关节作为人体关键承重关节，其表面覆盖的透明软骨是实现复杂运动功能的重要结构基础。透明软骨的存在不仅为关节提供了低摩擦界面及弹性缓冲机制，同时也参与下肢应力分布的生物力学调控过程及支撑膝关节的运动学特征，如内轴式运动、回旋锁定机制等[1]。目前已发现膝关节骨关节炎(osteoarthritis,OA)的发生、发展与膝关节软骨退变密切相关[2]，但目前其退变机制及病理进程尚不清楚。在以往膝关节外科临床工作中，评估软骨健康状况主要通过肉眼、关节镜和影像学等进行综合判断，软骨厚度并未得到足够重视。而随着数字化外科技术的发展，软骨厚度的个体化分布受到越来越多的关注。尤其是在机器人辅助全膝关节置换术(total knee arthroplasty,TKA)中，软骨厚度及其特异化分布是术前规划、术中截骨和术后疗效的核心参数[3-4]。软骨厚度亦是个体化膝关节重建手术(胫骨高位截骨术、运动对线法TKA)的重要参考[5-6]。

磁共振成像(magnetic resonance imaging,MRI)是目前临床上最常采用的软骨厚度测量方法，其也是评价关节软骨病损最敏感的无创检查方法，源于T2 map序列能定量分析软骨中水分子含量和胶原纤维排列方向，测量准确度高，但对MRI扫描参数有特殊要求，不同解剖部位均一性较差，且操作耗时，工作量较大，不同观察者间差异性较大，亦未考虑到种族、地区、职业、期望值等个体化因素的影响[7]。当前尚缺乏一种简单易行、重复性高的软骨厚度无创性检测方法。膝关节软骨厚度测定，对于指导医生为膝关节OA患者(尤其需接受TKA者)制定个体化、智能化手术方案及评估术后疗效，具有重要临床价值。本研究通过测量304例临床标本数据，利用数学模型分析膝关节OA患者人口学基线数据、疾病学基线指标、影像学指标与软骨厚度的相关性，并通过回归分析和比重检验建立数学预测模型，从科学、无创、精准方向为数字化、智能化TKA的实施提供参考。

1 资料与方法

1.1 临床资料

纳入2023年3月至2024年3月陆军军医大学第二附属医院来自西南四省区(重庆、四川、云南、贵州)并诊断为膝关节OA合并内翻畸形、拟行单侧TKA的

304例患者,其中男67例、女237例,年龄48~87岁,患病时间0.5~30.1年,左膝手术158例,右膝手术146例。本研究经陆军军医大学第二附属医院医学伦理委员会批准(批准号:2023-研第056-01),且患者或家属对本研究知情同意。

纳入标准:①年龄50~80岁,术前人口学和影像学基线数据完整;②诊断为膝关节OA合并内翻畸形;③符合TKA的适应证;④术前完善MRI检查并于术中完成软骨厚度测量。排除标准:①合并类风湿性关节炎或其他可能导致膝关节软骨病变的疾病;②合并骨折畸形愈合后遗症或创伤性关节炎导致关节软骨损伤;③伴有急性膝关节感染、膝关节滑膜炎(如痛风、结核等)、膝关节急性外伤,影响软骨厚度测量。

1.2 方法

采用电子游标卡尺(简称电子标尺)测量患者股骨远端外髁、外侧胫骨平台、股骨后内髁和股骨后外髁等的软骨厚度。电子标尺测量的准确度通过术前MRI分析、机器人导航系统示踪和手术标本组织切片进行检验,见图1。

手术标本组织切片及染色:对TKA术中获得的骨-软骨标本进行固定(4%多聚甲醛)后,依次进行脱钙(14%乙二胺四乙酸)、脱水(70%~100%乙醇梯度处理)、包埋(石蜡)等,制备切片(膝关节冠状位,厚度为4 μm)。番红O-固绿染色:切片脱蜡至水,依次浸于苏木精染色1 min,水洗,0.2%固绿染色5 min,1%醋酸10 s,0.1%番红染色5 min,水洗;梯度乙醇脱水,二甲苯透明;晾干后中性树胶封固,在光学显微镜下采集图像,见图1。

术前MRI分析:采用Siemens 3.0T Skyra高场强磁共振扫描仪,15通道膝关节表面线圈。扫描序列包括高分辨冠状位、矢状位、横轴位质子脂肪抑制序列、矢状位T2图,见图2a。成像参数参考既往研究[7-8]。

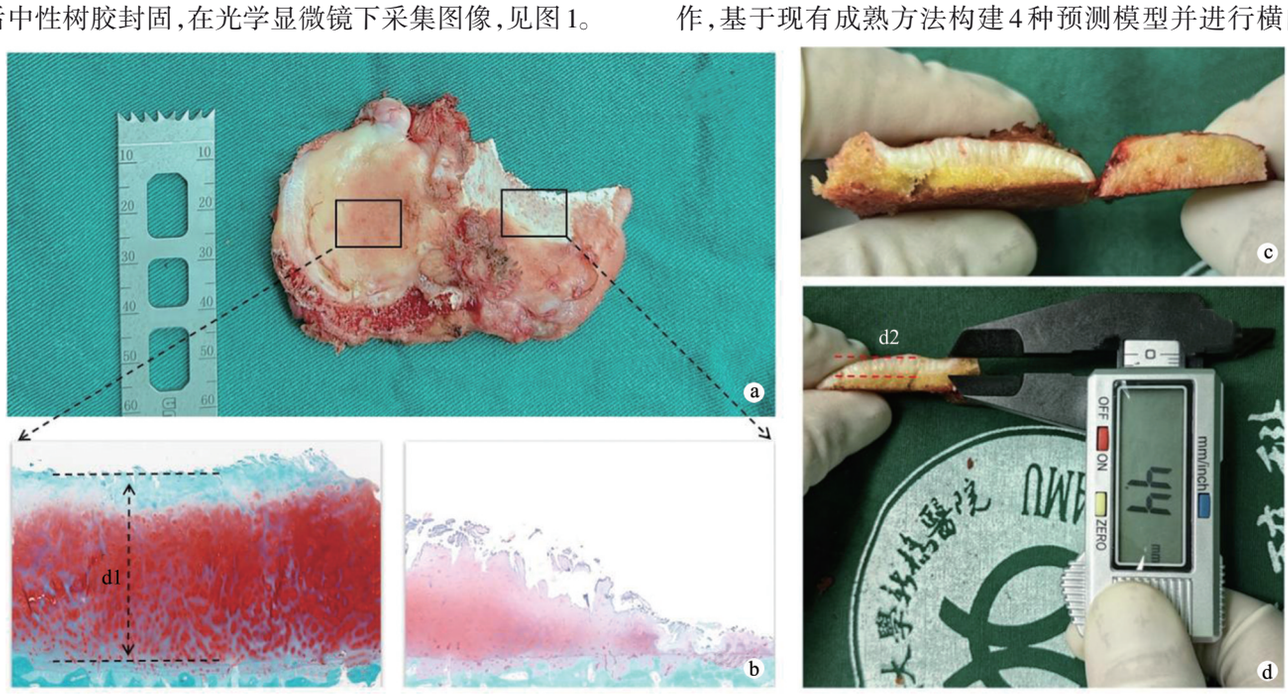
机器人导航系统示踪(元化智能,深圳):在机器人辅助TKA的注册完成后进行软骨厚度测量,用绿色尖头探针轻触健康关节面最高点记为初始值,系统显示数值(探针针尖到CT建模骨表面的垂直距离)记为X_1,后在同一测量点探针垂直刺穿软骨至软骨下骨表面,软件显示数值记为X_2,则软骨厚度$X=X_1-X_2$,见图2b、c。

1.3 观察指标

收集患者地区、年龄、性别、身高、体质量、职业、体质量指数(body mass index,BMI)等人口学基线指标,患病时间、Kellgren-Lawrence(KL)分期、纽约特种外科医院(Hospital for Special Surgery,HSS)膝关节评分、视觉模拟量表(visual analogue scale,VAS)评分、骨密度T值、合并症等疾病学基线指标,内翻畸形髋膝踝角(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)、胫骨平台后倾角(posterior tibial slope,PTS)、股骨后髁偏心距(posterior condylar offset,PCO)、髌骨高度(Insall-Salvati指数)等影像学指标。

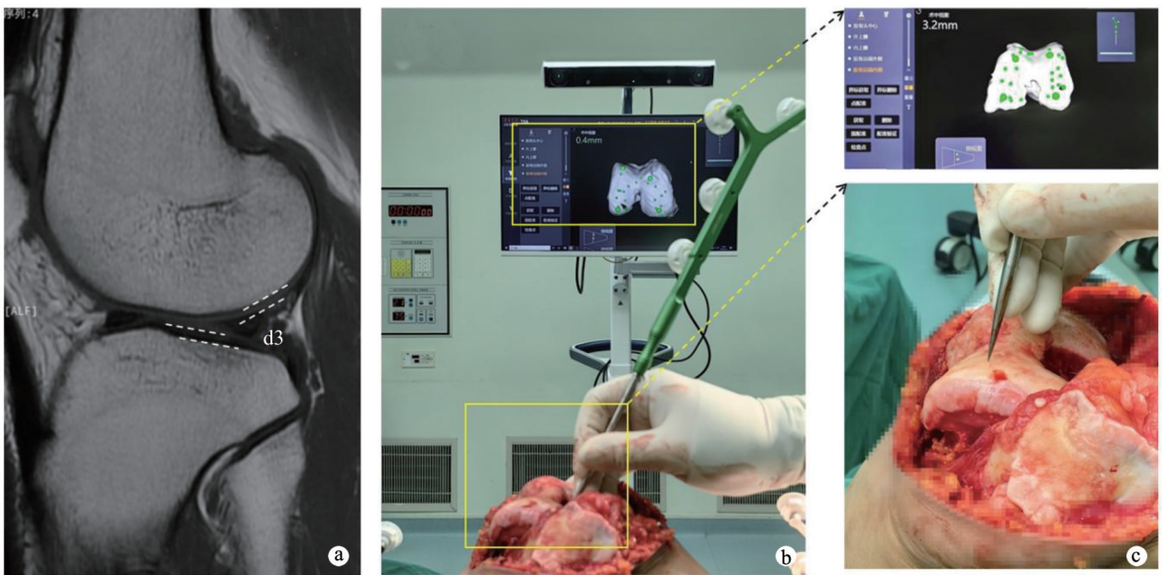
1.4 预测模型及预测效率评价指标

由临床医生联合医学数理统计团队开展建模工作,基于现有成熟方法构建4种预测模型并进行横向



a:TKA术后胫骨平台标本;b:番红O-固绿染色显示软骨厚度(×400);c、d:电子标尺测量软骨厚度

图1 手术标本组织切片染色及电子标尺测量软骨厚度



a:MRI测量软骨厚度;b、c:机器人导航系统测量软骨厚度

图2 MRI和机器人导航系统测量软骨厚度

对比,分别为线性回归模型、主成分分析模型、最小绝对收缩和选择算子(*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*,*LASSO*)回归模型以及*K*-最近邻算法(*K-nearest neighbors*,*KNN*)模型。

线性回归模型:采用线性回归作为基础回归模型,以股骨外踝软骨厚度、股骨后内踝软骨厚度、股骨后外踝软骨厚度、外侧胫骨平台软骨厚度作为因变量(*Y*),自变量(X)为性别、年龄、患病时间等,进行单因素分析。选取单因素分析中*P*<0.1的变量纳入多因素分析模型。将每个自变量的相关变量加入多因素分析模型,$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_e + \cdots + \beta_k X_k + c$。

主成分分析模型:对年龄、身高、BMI、患病时间、骨密度T值、HSS评分、Insall-Salvati指数、VAS评分、HKA、LDFA、MPTA、PTS、PCO、PCOR等变量进行主成分分析,取8个拟合变量。

*LASSO*回归模型:将数据集随机分为训练集(5/6)、测试集(1/6)。针对各个因变量进行*LASSO*算法选取自变量,对比CV、minimum BIC、adaptive三种惩罚力度估计方法,选取最优模型。

*KNN*模型:本研究将数据集随机分为训练集(90%)、测试集(10%)。*K*=10,采用STATA 16.1软件结合PYTHON算法。

预测效率评价指标选用决定系数(R^2)及均方根误差(*root mean square error*,*RMSE*)。R^2表示线性回归模型中由自变量*X*解释的响应变量*y*的变化比例。当$0.1 \leqslant R^2 < 0.3$,认为模型解释力较弱;当$0.3 \leqslant R^2 < 0.7$时,认为模型具有一定的解释力;$0.7 \leqslant R^2 < 1$认为模型解释力很强。其定义如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \in [0,1]$$

*RMSE*用以衡量预测模型在连续型数据上的预测精度。理想情况下,*RMSE*应该显著小于因变量的原始标准差,本研究定义*RMSE*<0.03时,模型预测的平均误差较为理想。计算公式如下(其中y_i是实际值,$\hat{y}_i$是预测值):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}, \in [0,+\infty)$$

1.5 统计学分析

采用STATA 16.1软件分析数据,连续变量以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,采用*Student's t*检验;非正态分布的数据以中位数和四分位数表示,采用*Wilcoxon*秩次检验。*P*<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者人口学、疾病学及影像学资料

患者人口学、疾病学和影像学资料见表1。

2.2 电子标尺测量膝关节软骨厚度的准确性与可靠性

选取纳入本研究的前20例软骨标本,采用术前MRI分析、机器人导航系统示踪和手术标本组织切片3种方法检验电子标尺测量的准确性和可靠性。结果显示,3种方法测得结果与电子标尺结果比较差异均无统计学意义(*P*>0.05),提示电子标尺测量膝关节软骨厚度具有一定准确性及可靠性,见表2。

2.3 线性回归分析

线性回归分析预测模型结果显示,年龄(≥60岁)、

表1 人口学、疾病学及影像学基线数据

变量		n	构成比(%)
地区	重庆	197	64.80
	四川	48	15.79
	贵州	30	9.87
	云南	29	9.53
年龄	55~59岁	57	18.75
	60~80岁	234	76.97
性别	男	67	22.04
	女	237	77.96
身高	<160.0 cm	172	56.58
	160.0~169.9 cm	109	35.86
	170.0~179.9 cm	21	6.91
	≥180.0 cm	2	0.65
体质量	<50.0 kg	6	1.97
	50.0~64.9 kg	179	58.89
	65.0~74.9 kg	84	27.63
	≥75.0 kg	35	11.51
职业	农民	223	73.36
	工人	27	8.88
	城市自由职业	54	17.76
患病时间	<5年	107	35.20
	5~10年	73	24.01
	>10年	124	40.79
BMI	偏瘦(<18.5 kg/m^2)	3	0.99
	正常(18.5~23.9 kg/m^2)	86	28.29
	超重(24.0~28.0 kg/m^2)	119	39.14
	肥胖(>28.0 kg/m^2)	96	31.58
骨密度T值	正常(>-1.0)	12	3.95
	骨量减少(-1.0~2.5)	59	19.41
	骨质疏松(<-2.5)	233	76.64
KL分期	Ⅲ期	29	9.54
	Ⅳ期	275	90.46
HSS膝关节评分	中(60~69分)	20	6.58
	差(<60分)	216	71.05
HKA	生理内翻(177.0°~180.0°)	48	15.79
	Ⅰ度内翻(175.1°~176.9°)	93	30.59
	Ⅱ度内翻(170.1°~175.0°)	126	41.45
	Ⅲ度内翻(≤170.0°)	37	12.17
LDFA	轻度偏移(85.0°~90.0°)	219	72.04
	中度偏移(80.0°~84.9°)	78	25.66
	重度偏移(75.0°~79.9°)	7	2.30
MPTA	轻度偏移(85.0°~90.0°)	216	71.05
	中度偏移(80.0°~84.9°)	88	28.95
PTS	轻度增加(3.0°~4.9°)	105	34.54
	中度增加(5.0°~9.9°)	173	56.91
	重度增加(≥10.0°)	26	8.55
Insall-Salvati指数	高位髌骨(>1.2)	22	7.24
	正常髌骨(0.8~1.2)	268	88.16
	低位髌骨(<0.8)	14	4.61
PCO	轻度减小(27.0~31.9 mm)	119	39.14
	中度减小(24.4~26.9 mm)	107	35.20
	重度减小(<24.4 mm)	78	25.66
合并症	高血压	72	23.68
	糖尿病	14	4.61
	冠心病	2	0.66

患病时间(5~10年)、MPTA(85.0°~90.0°)、性别(男,女)、KL分期(Ⅲ、Ⅳ期)与股骨外髁软骨厚度相关;Insall-Salvati指数(>1.2)、职业(工人)、地区(云南)与股骨后内髁软骨厚度相关;职业(工人)、地区(云南)

表2 4种方法对不同解剖部位软骨厚度的测量结果($\bar{x}\pm s$,mm)

方法	股骨远端外髁软骨厚度	股骨后内髁软骨厚度	股骨后外髁软骨厚度	外侧胫骨平台软骨厚度
术前MRI	2.21±0.44	1.99±0.37	2.31±0.42	2.57±0.39
机器人导航系统示踪	2.14±0.37	2.02±0.40	2.25±0.36	2.65±0.32
电子标尺	2.19±0.41	2.06±0.35	2.28±0.33	2.62±0.30
手术标本组织切片	2.25±0.34	1.97±0.42	2.22±0.39	2.69±0.35
P	0.19	0.15	0.36	0.20

与股骨后外髁软骨厚度相关;年龄(≥60岁)、性别(男)、患侧(右侧)与外侧胫骨平台软骨厚度相关。

预测模型结果为:

股骨外踝软骨厚度=3.464+0.004×年龄-0.001×患病时间-0.146×MPTA(85.0°~90.0°)-0.345(if男性&KL分期Ⅲ期)-0.198(if女生&KL分期Ⅳ期)+0.438(if男性&KL分期Ⅳ期),R^2=0.12,*RMSE*=0.30

股骨后内踝残余软骨厚度=1.875-0.295×Insall-Salvati指数-0.296(if工人)-0.525(if云南),R^2=0.04,*RMSE*=0.35

股骨后外踝软骨厚度=2.62-0.242(if工人)-0.489(if云南),R^2=0.02,*RMSE*=0.33

外侧胫骨平台软骨厚度=2.51-0.005×年龄-0.136(if男)-0.073(if患侧为右侧),R^2=0.06,*RMSE*=0.30

上述模型R^2<0.3、*RMSE*>0.03,均未达预期数值,预测效果不理想。

2.4 主成分分析

主成分分析先取8个拟合变量(Comp1~8),见表3。

Comp1=0.231 9×年龄+0.03×身高+0.233 4×体质量+…+0.344 8×PCOR

Comp2=-0.242 2×年龄+0.403 8×身高+0.631 0×体质量+…+(-0.064 0)×PCOR

Comp8=0.418 3×年龄+0.586 6×身高+…+(-0.314 8)×PCOR

预测模型:

股骨外踝软骨厚度=2.414-0.033×Comp4-0.018×Comp7-0.197(if女性&KL分期Ⅳ期)+0.452(if男性&KL分期Ⅳ期),R^2=0.09,*RMSE*=0.31

股骨后内踝残余软骨厚度=1.875-0.295×Insall-Salvati指数-0.296(if工人)-0.525(if云南),R^2=0.04,*RMSE*=0.35

股骨后外踝残余软骨厚度=2.629-0.040×Comp8+0.236(if工人)-0.506(if c),R^2=0.05,*RMSE*=0.33

股骨后外踝软骨厚度=2.677+0.148(if男)-0.071

表3 主成分分析结果

变量	Comp1	Comp2	Comp3	Comp4	Comp5	Comp6	Comp7	Comp8
年龄	0.231 9	−0.242 2	−0.093 3	0.161 5	0.059 1	0.206 9	−0.144 9	0.418 3
身高	0.030 1	0.403 8	0.206 6	0.126 1	−0.287 1	−0.248 9	−0.159 7	0.586 6
体质量	0.233 4	0.631 0	−0.135 1	0.046 5	−0.016 3	0.094 2	−0.070 4	0.021 0
BMI	0.254 7	0.483 8	−0.277 9	−0.052 3	0.144 9	0.287 5	0.010 2	−0.325 1
患病时间	0.197 8	−0.121 9	−0.012 7	0.266 2	0.238 7	0.401 9	0.364 3	0.145 4
骨密度T值	−0.217 6	−0.021 6	0.280 5	−0.305 4	0.196 9	0.219 7	−0.476 0	0.003 1
HSS膝关节评分	−0.193 5	0.167 0	0.267 1	−0.455 3	0.034 2	0.189 3	0.043 9	−0.113 3
Insall-Salvati指数	−0.061 1	0.087 3	0.052 3	−0.297 4	0.554 1	0.090 2	0.344 9	0.457 6
VAS评分	0.021 6	−0.069 5	−0.232 8	0.340 0	0.482 6	−0.175 0	−0.416 6	−0.110 3
HKA	−0.443 4	0.181 4	0.156 3	0.364 3	0.023 2	0.039 7	0.084 9	−0.048 7
LDFA	0.288 2	−0.153 1	−0.198 5	−0.298 5	−0.290 8	−0.161 5	0.278 7	−0.028 9
MPTA	−0.403 4	0.110 5	0.036 9	0.303 6	−0.041 2	−0.001 8	0.422 2	−0.125 0
PTS	0.036 5	−0.110 5	0.140 1	0.160 9	−0.377 8	0.681 6	−0.149 8	0.016 9
PCO	0.367 8	0.074 1	0.530 7	0.177 6	0.083 6	−0.123 4	0.067 2	−0.033 1
PCOR	0.344 8	−0.064 0	0.528 6	0.079 2	0.139 3	−0.108 7	0.068 3	−0.314 8

（患病时间>10年），R^2=0.004，*RMSE*=0.30

上述模型R^2<0.3、*RMSE*>0.03，均未达预期，预测效果不理想。

2.5 *LASSO*回归分析

*LASSO*回归模型结果显示，股骨后内髁残余、股骨后外髁及外侧胫骨平台预测模型均无有效；仅股骨外髁预测模型有效，股骨外踝=2.026−0.011×患病时间+0.006×年龄（if女性）−0.176（if KL分期Ⅳ期）+0.094（if重庆），R^2=0.12，*RMSE*=0.31，股骨外髁预测模型R^2<0.3、*RMSE*>0.03，均未达预期，预测效果不理想。

2.6 *KNN*分析

*KNN*预测模型结果显示，股骨外髁、外侧胫骨平台预测模型存在潜在预测可能性（*accuracy*=0.21，*accuracy*=0.15），但预测效果并不理想（R^2=0.23，*RMSE*=0.29）；股骨后内髁、股骨后外髁预测模型预测价值较低（*accuracy*=0.05，*accuracy*=0.01），见图3。

e(0PT_NN) = 10
e(TEST_ACCURACY) = 0.2100166862726068
e(TRAIN_ACCURACY) = 0.9999999999939077
e(BEST_INDEX) = 1
e(SE_TEST_ACCURACY) = 0.4302982821120934
e(N_F0LDS) = 10
e(Train_mse) = 5.90124736866e-13
e(Train_mape) = 0.0000149194660032
e(Test_mse) = 1.54540299539e-14
e(Test_mape) = 2.85332152412e-06
e(N_features) = 20
e(N_train_all) = 405
e(N_test_all) = 31
e(N_train_used) = 397
e(N_test_used) = 31 ⓐ

e(0PT_NN) = 10
e(TEST_ACCURACY) = −0.52894097894935
e(TRAIN_ACCURACY) = 0.9999999999948314
e(BEST_INDEX) = 1
e(SE_TEST_ACCURACY) = 0.9267522958827795
e(N_F0LDS) = 10
e(Train_mse) = 0.1919993437688182
e(Train_mape) = 15.8864368162501
e(Test_mse) = 1.20008387440e-14
e(Test_mape) = 2.85625050596e-06
e(N_features) = 20
e(N_train_all) = 467
e(N_test_all) = 31
e(N_train_used) = 459
e(N_test_used) = 31 ⓑ

e(0PT_NN) = 10
e(TEST_ACCURACY) = 0.0108483172475499
e(TRAIN_ACCURACY) = 0.9999999999964551
e(BEST_INDEX) = 1
e(SE_TEST_ACCURACY) = 0.8820725108193114
e(N_F0LDS) = 10
e(Train_mse) = 0.2067472928317168
e(Train_mape) = 15.22809820308863
e(Test_mse) = 6.54603661371e-15
e(Test_mape) = 1.83860454490e-06
e(N_features) = 20
e(N_train_all) = 498
e(N_test_all) = 31
e(N_train_used) = 490
e(N_test_used) = 31 ⓒ

e(0PT_NN) = 10
e(TEST_ACCURACY) = 0.1480034823438107
e(TRAIN_ACCURACY) = 0.9999999999919629
e(BEST_INDEX) = 1
e(SE_TEST_ACCURACY) = 0.8223319309987912
e(N_F0LDS) = 10
e(Train_mse) = 0.3057007551572296
e(Train_mape) = 16.38223289247054
e(Test_mse) = 3.50040519895e-15
e(Test_mape) = 9.45820616035e-07
e(N_features) = 20
e(N_train_all) = 529
e(N_test_all) = 31
e(N_train_used) = 521
e(N_test_used) = 31 ⓓ

a：股骨外髁；b：股骨后内髁；c：股骨后外髁；d：外侧股骨平台

图3 *KNN*分析

3 讨论

目前膝关节软骨厚度的测量以术前MRI及术中测量为主。部分研究通过优化创新算法以提高测量的精准度及实现测量的自动化[9-10],近年来亦有部分研究在此基础上关注影响软骨厚度测量的可能因素[11-12],而进一步量化各因素对软骨厚度贡献的研究较为缺乏。本研究基于近年来主流临床预测模型分析,收集人口学基线指标、疾病学基线指标和影像学指标建立数据集,选取了4种实用性和适用性较强的临床预测模型尝试建立膝关节软骨厚度的预测模型,结果显示,线性回归分析、主成分分析、*LASSO*回归模型的预测效果并不理想,其主要原因在于:①数据集偏小,预测变量的精度相对较高,导致单位*Y*值的数据密度较低(厚度通常为0~3 mm,0.1为单位长度,300条数据,平均密度300/30=10);②数据代表性不足,如职业大多为农民,其余职业人群代表性不足,增大了预测难度。另外,本研究中采用的4种方法在实际操作中,因测量位置和切片取材部位的不同及测量时的主观偏差可能导致一定的测量误差,这在一定程度上会削弱预测结果的准确性。我们将在后续的研究中扩大样本,采用多个测量者对同一手术标本的同一解剖学分区进行多次测量,并采用国际上通用的观察者组内偏差和观察者组间偏差进行质量控制,以提高测量的准确性。

尽管线性回归分析、主成分分析、*LASSO*回归分析的预测效果均不理想,但不代表变量之间没有潜在关系,只能说明在该数据集中,期望预测变量(股骨外髁软骨厚度、股骨后外髁软骨厚度、股骨后内髁残余软骨厚度、外侧胫骨平台软骨厚度)与变量未见强关联。而在*KNN*算法中,展现了股骨外髁、外侧胫骨平台的预测可能性,但该算法需要进一步增加样本量、扩充数据集,以获得预测精度高的统计模型。

此外,本研究虽然没有获得足够理想的预测模型,但可根据多因素分析筛选出的各预测变量的潜在自变量,进行探索性分析,并找到存在相关性的变量,为以后建立可靠的预测模型提供参考。*KNN*模型证实了股骨外髁、外侧胫骨平台作为关键预测模型的可能性,但*KNN*算法对数据量的要求较高,本研究样本量无法满足要求,今后可重点探索*KNN*算法(机器学习)在更多例数软骨手术标本预测的科学性和准确性。

综上所述,基于国人个体参数的膝关节软骨厚度预测模型的构建具有科学性和可行性,但因样本量不足、个体参数权重不清等原因,预测模型尚待进一步优化。此外,本研究仅针对股骨远端外髁、股骨后内髁、股骨后外髁和外侧胫骨平台4个部位的软骨厚度进行预测,而未能采集胫骨内侧平台及股骨远端内侧髁的数据,对于膝关节整体软骨数据尚有不足,在今后工作中拟选择合并外翻畸形的膝关节OA进行完善。

[参考文献]

[1] Katz JN, Arant KR, Loeser RF. Diagnosis and treatment of hip and knee osteoarthritis: a review[J]. JAMA, 2021, 325(6): 568-578. doi: 10.1001/jama.2020.22171.

[2] Yao Q, Wu X, Tao C, et al. Osteoarthritis: pathogenic signaling pathways and therapeutic targets[J]. Signal Transduct Target Ther, 2023, 8(1): 56. doi: 10.1038/s41392-023-01330-w.

[3] Giurazza G, Caria C, Campi S, et al. Femoral cartilage thickness measured on MRI varies among individuals: time to deepen one of the principles of kinematic alignment in total knee arthroplasty: a systematic review[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2025, 33(2): 634-645. doi: 10.1002/ksa.12408.

[4] Nam JH, Koh YG, Kim PS, et al. Effect of the presence of the articular cartilage on the femoral component rotation in total knee arthroplasty in female and varus osteoarthritis knees[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 499. doi: 10.1186/s13018-020-02030-9.

[5] Niinimäki TT, Eskelinen A, Mann BS, et al. Survivorship of high tibial osteotomy in the treatment of osteoarthritis of the knee[J]. J Bone Joint Surg Br, 2012, 94(11): 1517-1521. doi: 10.1302/0301-620x.94b11.29601.

[6] Carr AJ, Robertsson O, Graves S, et al. Knee replacement[J]. Lancet, 2012, 379(9823): 1331-1340. doi: 10.1016/s0140-6736(11)60752-6.

[7] 胡 娜, 张 燕, 盛 敏, 等. 基于磁共振分区的健康膝关节软骨T2图[J]. 中国医学科学院学报, 2011, 33(1): 66-70. doi: 10.3881/j.issn.1000-503X.2011.01.014.

[8] 唐艳华, 徐 贤, 江 波, 等. 3.0T磁共振成像对健康青年人膝关节软骨T2值及厚度的定量分析[J]. 中国医学科学院学报, 2013, 35(2): 131-135. doi: 10.3881/j.issn.1000-503X.2013.02.001.

[9] Guo J, Yan P, Qin Y, et al. Automated measurement and grading of knee cartilage thickness: a deep learning-based approach[J]. Front Med (Lausanne), 2024, 11: 1337993. doi: 10.3389/fmed.2024.1337993.

[10] Li S, Zhao S, Zhang Y, et al. Source-free unsupervised adaptive segmentation for knee joint MRI[J]. Biomed Signal Process Control, 2024, 92: 6028. doi: 10.1016/j.bspc.2024.106028.

[11] Si L, Xuan K, Zhong J, et al. Knee cartilage thickness differs alongside ages: a 3-T magnetic resonance research upon 2,481 subjects via deep learning[J]. Front Med (Lausanne), 2021, 7: 600049. doi: 10.3389/fmed.2020.600049.

[12] Jansen MP, Turmezei TD, Dattani K, et al. Cartilage thickness distribution and its dependence on demographic, radiographic, and MRI structural pathology in knee osteoarthritis-data from the IMI-APPROACH cohort[J]. Skeletal Radiol, 2025. doi: 10.1007/s00256-025-04907-4.

(编辑:贺绍梅)