

· 临床研究 ·

机器人辅助全膝关节置换术治疗膝骨关节炎内翻畸形的早期疗效

杨鑫¹, 程晴灏², 张富强², 樊华¹, 张福康¹, 张壮壮¹, 杨永泽¹, 张安任¹, 郭洪章²

(1. 甘肃中医药大学第一临床医学院 甘肃省人民医院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省人民医院骨科四病区, 甘肃兰州 730000)

【摘要】 目的:探讨机器人辅助人工全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)治疗膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)内翻畸形患者的临床疗效及优势。**方法:**回顾性分析 2022 年 10 月至 2023 年 6 月,行 TKA 治疗 59 例重度 KOA 导致膝关节内翻畸形患者的临床资料,年龄 59~81(70.90±4.63)岁;男 19 例,女 40 例;按手术方式不同分为机器人组和传统组。机器人组 28 例,男 8 例,女 20 例,年龄(70.54±4.80)岁,病程(14.89±8.72)个月;传统组 31 例,男 11 例,女 20 例,年龄(71.39±4.50)岁,病程(12.32±6.73)个月。记录两组并发症发生情况,手术时间、术中出血量、术后下床时间。并比较两组手术前后膝关节活动度、美国膝关节协会评分(Knee Society scores, KSS),疼痛视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)评估患者疼痛。观察比较两组手术前后的髋-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),术后 6 个月胫骨平台后倾角(lateral tibia component, LTC)、冠状面胫骨组件角(frontal tibia component, FTC)、冠状面股骨组件角(frontal femoral component, FFC)、矢状面股骨组件角(lateral femoral component, LFC)。**结果:**所有患者伤口 I 期愈合,无并发症发生;所有患者获得随访,时间 6~8(6.5±1.5)个月。术前两组影像学(HKA、LDFA、MPTA)评价指标、膝关节活动度、VAS、KSS 比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。机器人组和传统组手术时间[(109.11±7.16) min vs. (83.90±7.85) min]、切口长度[(16.60±2.33) cm vs. (14.47±1.41) cm]、术中出血量[(106.93±6.15) ml vs. (147.97±7.62) ml]、术后下床时间[(17.86±1.84) h vs. (21.77±2.68) h]及术后 6 个月的 FFC[(88.96±0.84)° vs. (87.93±1.09)°]、LFC[(88.57±1.10)° vs. (87.16±1.21)°]比较,差异有统计学意义($P<0.05$)。术后 1、3、6 个月,机器人组 KSS[(75.96±3.96)、(81.53±3.78)、(84.50±3.29)分],VAS[(3.68±0.67)、(2.43±0.79)、(0.54±0.64)分],膝关节活动度[(113.32±4.72)°、(123.93±3.99)°、(135.36±2.34)°];传统组 KSS[(73.77±4.18)、(76.48±3.60)、(80.19±3.28)分],VAS[(4.16±1.04)、(3.03±0.75)、(1.42±0.76)分],膝关节活动度[(109.19±6.95)°、(119.94±6.08)°、(134.48±2.14)°]。与术前相比,两组术后 1、3、6 个月 KSS、VAS、膝关节活动度均显著改善,差异有统计学意义($P<0.001$)。两组术后 HKA[(180.39±1.95)° vs. (178.52±2.23)°]、LDFA[(89.67±0.63)° vs. (89.63±0.63)°]、MPTA[(89.44±0.55)° vs. (89.29±0.60)°],均较术前改善,差异有统计学意义($P<0.001$)。术后 1、3、6 个月,机器人组 KSS、VAS 均优于传统组($P<0.05$);术后 1、3 个月,机器人组膝关节活动度均高于传统组,差异有统计学意义($P<0.05$),但术后 6 个月,机器人组膝关节活动度与传统组比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。**结论:**机器人辅助 TKA 是一种安全有效的 TKA 系统。与传统组相比,机器人组不仅可以帮助术前存在内翻畸形的患者获得更好的肢体轴线和假体对位,而且还能获得更好的影像和临床效果。

【关键词】 机器人; 全膝关节置换术; 膝骨关节炎; 内翻畸形

中图分类号: R684.3

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20230777

Early impact of robot-assisted total knee arthroplasty on the treatment of varus knee arthritisYANG Xin¹, CHENG Qing-hao², ZHANG Fu-qiang², FAN Hua¹, ZHANG Fu-kang¹, ZHANG Zhuang-zhuang¹, YANG Yong-ze¹, ZHANG An-ren¹, GUO Hong-zhang² (1. The First Clinical Medical College of Gansu University of Chinese Medicine (Gansu Provincial People's Hospital, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. The Fourth Ward of Orthopaedics, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, Gansu, China))**ABSTRACT Objective** To investigate the clinical efficacy and advantages of robot-assisted total knee arthroplasty (TKA) in patients with varus knee osteoarthritis. **Methods** Between October 2022 and June 2023, a total of 59 patients with severe

基金项目: 甘肃省自然科学基金(编号: 20JR10RA358); 兰州市科技厅项目(编号: 2023-2-101)

Fund program: Gansu Natural Science Foundation (No. 20JR10RA358)

通信作者: 郭洪章 E-mail: hongzhangguo2022@126.com

Corresponding author: GUO Hong-zhang E-mail: hongzhangguo2022@126.com

knee osteoarthritis resulting in varus were treated with total knee arthroplasty, aged from 59 to 81 years with an average (70.90 ± 4.63) years, including 19 males and 40 females. The patients were divided into two groups based on the surgical method used: 28 patients in the robot group and 31 patients in the traditional group. The robot group consisted of 8 males and 20 female patients, with an average age of (70.54 ± 4.80) years and an average disease duration of (14.89 ± 8.72) months. The traditional group consisted of 11 males and 20 females patients, with an average age of (71.39 ± 4.5) years and an average disease duration of (12.32 ± 6.73) months. The operative duration, amount of bleeding during the operation, postoperative activity time after the operation, hip-knee-ankle angle (HKA), lateral distal femoral angle (LDFA), medial proximal tibial angle (MPTA), and complications were compared between the two groups before and after the operation. Lateral tibia component (LTC), frontal tibia component (FTC), frontal femoral component (FFC) and lateral femoral component (LFC) were measured 6 months after operation. Additionally, the degree of knee joint motility, American Knee Society score (KSS), and visual analogue scale (VAS) were compared before and after the operation. **Results** All patients had grade I wound healing without any complications, and all patients were followed up for 6 to 8 months, with an average of (6.5 ± 1.5) months. There were no significant differences preoperative imaging evaluation indexes (including HKA, LDFA, and MPTA), preoperative knee mobility, preoperative VAS, and preoperative KSS between the two groups ($P > 0.05$). Comparing the operation time (109.11 ± 7.16) min *vs.* (83.90 ± 7.85) min, length of the incision (16.60 ± 2.33) cm *vs.* (14.47 ± 1.41) cm, intraoperative bleeding (106.93 ± 6.15) ml *vs.* (147.97 ± 7.62) ml, postoperative activity time (17.86 ± 1.84) h *vs.* (21.77 ± 2.68) h, between the two groups showed statistically significant differences ($P < 0.05$). There were significant differences in FFC (88.96 ± 0.84)° *vs.* (87.93 ± 1.09)° and LFC (88.57 ± 1.10)° *vs.* (87.16 ± 1.2)° between the two groups at 6 months after operation ($P < 0.05$). The robotic group 1, 3, 6 months after KSS (75.96 ± 3.96), (81.53 ± 3.78), (84.50 ± 3.29) scores, VAS (3.68 ± 0.67), (2.43 ± 0.79), (0.54 ± 0.64), knee joint mobility (113.32 ± 4.72)°, (123.93 ± 3.99)°, (135.36 ± 2.34)°; Traditional group KSS (73.77 ± 4.18), (76.48 ± 3.60), (80.19 ± 3.28) scores, VAS (4.16 ± 1.04), (3.03 ± 0.75), (1.42 ± 0.76) scores, knee joint mobility (109.19 ± 6.95)°, (119.94 ± 6.08)°, (134.48 ± 2.14)°. Compared to before surgery, both groups showed significant improvement in KSS, VAS and knee mobility during the three follow-up visits ($P < 0.001$). Additionally, postoperative HKA (180.39 ± 1.95)° *vs.* (178.52 ± 2.23)°, LDFA (89.67 ± 0.63)° *vs.* (89.63 ± 0.63)°, and MPTA (89.44 ± 0.55)° *vs.* (89.29 ± 0.60)° were significantly improved in both groups compared to before surgery ($P < 0.001$). The robotic group had higher KSS than the traditional group at 1, 3, and 6 months after surgery ($P < 0.05$). The robotic group also had lower VAS than the traditional group at 1, 3, and 6 months after surgery ($P < 0.05$). Furthermore, knee mobility was higher in the robotic group than those in the traditional group at 1 and 6 months after surgery ($P < 0.05$), but there was no significant difference between the two groups at 6 months after surgery. **Conclusion** Robot-assisted total knee arthroplasty is a safe and effective method for total knee replacement. The use of robotics can improve the limb axis and prosthesis alignment for patients with preoperative varus deformity, resulting in better clinical and imaging outcomes compared to the conventional group.

KEYWORDS Robot; Total knee arthroplasty; Knee osteoarthritis; Varus deformity

膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是一种临床常见的膝关节退行性病变,一般发病人群以老年人居多。随着我国人口老龄化加剧,我国 KOA 患者已高达 4 000 万,且以每年不低于 30 万的速度增长^[1]。常见临床症状包括关节间隙变窄、膝关节部位疼痛及关节活动度减小。当患者膝关节退变发展至终末期时,常发生膝关节内翻、外翻及屈曲畸形等严重合并症,内翻畸形是最常见的表现,可达到膝关节畸形的 90%以上^[2]。胫骨结构异常及膝关节周围软组织失衡是膝关节内翻畸形的重要发生机制,骨关节炎长期刺激会导致胫骨内侧出现增生骨赘,进一步导致内侧软组织张力升高及内外侧软组织挛缩、松弛,使得内外侧张力不平衡,加重膝盖内侧磨损^[3]。胫骨结构性异常会导致膝关节内外侧半月板的应力不均衡,受力不均会进一步加重膝关节内侧半月板磨损,易导致胫骨内侧骨块发生缺损。胫骨结构发生缺损后会进一步加重膝内翻,从而导致恶性

循环^[4]。目前,临床主要选择全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)、胫骨高位截骨术(high tibia osteotomy, HTO)两种外科手术方式进行治疗。TKA 是治疗终末期 KOA 最成功的方法,现已有临床研究证实 TKA 可以减轻终末期 KOA 患者疼痛症状,提高患者关节功能和生活质量^[5],虽然近年来 TKA 的手术技术日趋成熟,但仍存在假体放置不精确、机械轴恢复差等问题,聚乙烯磨损增加,过早松动,导致早期翻修手术,最终导致患者对手术不满意^[6]。因此,假体的准确放置和下肢轴线的对齐对减少术后并发症、延长假体存活时间起着关键作用,并直接影响 TKA 的远期疗效^[7]。在传统的 TKA 中,用手术器械根据骨性标记来确定假体的位置,这高度依赖于操作者的经验,存在准确性和重复性低等不足^[8]。为了解决这些问题,在 TKA 中应用了机器人辅助系统。机器人辅助系统可以有效地提高假体放置的精度,改善肢体轴线的对准^[9]。然而,目前仍存在一些

争议^[10]:一些研究认为,机器人辅助系统不能比传统的 TKA 技术获得更好的手术结果^[11];但 LIOW 等^[12]发现,机器人辅助系统可以显著改善 TKA 中的植入对准。所以,机器人辅助 TKA 的优劣性需要进一步的分析。有研究就机器人辅助下 TKA 的疗效和安全性进行了分析^[13],但对于机器人辅助下 TKA 治疗伴有严重畸形的 KOA 患者的疗效和安全性目前报道较少。本研究回顾性分析 2022 年 10 月至 2023 年 6 月采用机器人辅助 TKA 治疗 KOA 内翻畸形患者的资料,观察其早期临床疗效,以验证该系统对于存在膝内翻畸形患者治疗的有效性和安全性。

1 资料与方法

1.1 病例选择

纳入标准:(1)年龄>18 岁。(2)影像学证据表明为终末期 KOA 即根据 KELLGREN 等^[4]制定的 Kellgren-Lawrence 分级为Ⅳ级,经保守治疗无效自愿选择接受 TKA 手术。(3)无明显关节外畸形,无膝关节手术史,骨缺损厚度<10 mm。排除标准:(1)身体质量指数(body mass index,BMI)>35 kg·m⁻²。(2)合并类风湿关节炎、强直性脊柱炎等自身免疫性疾病以及夏科氏关节炎等神经系统病变患者。(3)拟手术部位急性或慢性感染或全身感染,无法耐受手术者。(4)严重骨质疏松。(5)对植入材料过敏。(6)严重精神疾病无法配合康复治疗。(7)下肢神经肌肉疾病和其他影响术后正常功能康复的疾病。(8)髋关节疾病,伴有明显的骨缺损或手术侧关节活动明显受限。

1.2 临床资料

回顾性分析甘肃省人民医院骨科因重度 KOA 导致膝关节内翻患者 59 例,年龄 59~81 (70.90±4.63)岁;男 19 例,女 40 例;BMI(24.22±3.07) kg·m⁻²。按手术方式不同分为机器人组 28 例和传统组 31 例。其中机器人组 28 例,男 8 例,女 20 例;年龄(70.54±4.80)岁;病程(14.89±8.72)个月;BMI 为(24.57±3.56) kg·m⁻²。传统组 31 例,男 11 例,女 20 例;年龄(71.39±4.50)岁;BMI 为(23.90±2.56) kg·m⁻²;病程(12.32±6.73)个月。两组年龄、性别、病程、侧别比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),具有可比性,见

表 1。对照组受试者行传统的 TKA。本研究已通过甘肃省人民医院伦理审查委员会审批(批号:2023-333),并获得患者知情同意。

1.3 治疗方法

1.3.1 术前准备 手术均由同一组高年资医师团队完成。麻醉方式选择蛛网膜下腔阻滞联合硬膜外麻醉,手术均在止血带下进行,采用膝前正中切口、髌旁内侧入路。

1.3.2 手术方法 机器人组:应用鸿鹄膝关节手术机器人系统(苏州微创畅行机器人有限公司)辅助下行 TKA,机器人组使用 ADVANCED MP(Microport Orthopedics 公司,美国)假体。(1)术前规划设计。依据术前 CT 数据建立全下肢三维模型,股骨假体在冠状位与下肢力线呈 90°垂直,矢状位与股骨解剖轴线呈 4°前倾,横断位上与股骨内外髁上线平行;胫骨假体在冠状位上与胫骨解剖轴呈 90°垂直,矢状位上后倾 4°,横断位上外旋对准胫骨结节中内 1/3 交界处。计算出截骨角度和截骨量。(2)调整支持网络设备接口协议(network device interfac,NDI)红外摄像头、手术台、机械臂三者间位置。确保手术全程不遮挡红外摄像头,红外线导航受阻将导致手术暂停,调整三者位置以确保手术准确安全。(3)将光学靶标安装在机械臂、股骨及胫骨的将配合导航系统进行空间定位与配准。(4)患者取平卧位,患肢外侧于手术床安放挡板,患侧肢体远端摆放滚轴以利于术中肢体摆放,所有患者使用止血带。术者以髋关节定位股骨头旋转中心、膝关节中心点多方向活动下肢,手持靶标定位内踝和外踝并确定踝穴中心。根据股骨头旋转中心、膝关节中心点、踝穴中心明确下肢力线情况。(5)右大腿根部绑气压止血带。设置时间 120 min,压力 300 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)。常规消毒铺巾,驱血后,气压止血带充气,压力维持 300 mmHg。取膝关节前正中切口,依次切开皮肤、皮下组织,髌旁内侧入路切开关节囊、外翻髌骨,屈膝,切除增生滑膜组织,残余半月板和前、后交叉韧带。于胫骨结节远侧 4 横指以上胫骨内侧面及切口内股骨内侧分别打入 2 根克氏针,安装并调整参考架位

表 1 两组膝关节内翻畸形患者术前一般资料比较
Tab.1 Comparison of general preoperative data between two groups of patients with varus knee arthritis

组别	例数	年龄($\bar{x}\pm s$)/岁	性别/例		BMI ($\bar{x}\pm s$)/(kg·m ⁻²)	病程($\bar{x}\pm s$)/月	侧别/例	
			男	女			左侧	右侧
机器人组	28	70.54±4.80	8	20	24.57±3.56	14.89±8.72	16	12
传统组	31	71.39±4.50	11	20	23.90±2.56	12.32±6.73	17	14
检验值		$t=-0.703$	$\chi^2=0.322$		$t=0.834$	$t=1.274$	$\chi^2=0.032$	
P 值		0.485	0.570		0.408	0.208	0.859	

置,确保参考架牢固固定。安放胫骨侧及股骨侧定位钉,旋转患肢,定位股骨头中心,完成股骨侧及胫骨侧注册。紧贴骨膜于胫骨平台前内侧松解内侧副韧带浅层,松解深度至暴露胫骨平台内侧前方骨赘即可,咬除胫骨平台前内方骨赘,骨刀去除股骨内侧髁骨赘。观察术前规划,结合术中实际判定规划假体大小是否合适,再进行股骨髁四合一截骨,因使用内轴膝关节假体,所以无须行髁间截骨。接着行胫骨平台垂直截骨,胫骨平台后倾角度设置为 $0^{\circ} \sim 4^{\circ}$,在伸直及屈曲患肢 90° 下测试内外侧间隙。因患者内翻畸形,往往屈伸状态下内侧间隙较外侧小,应力下观察内外侧间隙差值,故不采取伸直位内翻股骨假体以求伸直状态下内外侧间隙平衡,而是在术前规划中严格按照理想下肢矫正力线设计内外翻截骨角度。同样,屈膝 90° ,应力下观察内外侧间隙差值,也不采取外旋股骨假体以使得屈曲状态下内外侧间隙平衡,而是严格根据患者个体解剖标志确定个性化的股骨外旋角度。后用骨刀或摆锯切除胫骨平台内后方明显增生部分,必要时适当缩容胫骨平台,松解股骨内髁后方附着的关节囊,观察机器人实时显示的关节间隙,并进行微调,直到出现满意的内外侧屈伸间隙矩形平衡。见图 1。

再次测试直至屈伸间隙满意,假体位置、大小满意,力线满意。安放假体试模,检查屈伸间隙是否平衡,下肢力线、患肢伸直状态及髌骨轨迹是否满意,同时测试并观察计算机上所显示的下肢力线的膝关节内外翻角度。显示数值满意后先拆除参考架及定位钉以利于假体安装操作,取出试模,“鸡尾酒”局部封闭,安装假体。再次验证,满意后冲洗术区,逐层关闭切口,患肢加压包扎。传统组使用 Unique Total Knee System(正天公司,中国)假体,两组均未行髌

骨置换,手术流程按照传统 TKA 进行。

1.3.3 术后处理 两组术后常规予预防感染、超前镇痛、冰敷消肿、预防血栓治疗。术后第 2 天即可使用助行器下地负重行走。卧床行直腿抬高锻炼股四头肌力量,主动与被动屈伸膝训练防止关节僵硬,术后 48 h 内达到屈曲不低于 90° 的目标。

1.4 观察项目与方法

分别于术后 1、3、6 个月观察并比较两组围手术期相关指标,如手术时间和术中失血量。术后测量膝关节活动范围(range of motion, ROM),采用美国膝关节协会评分(Knee Society score, KSS)^[15]从疼痛、活动度、稳定性方面评估膝关节功能,总分 100 分,分数越高说明膝关节功能越好。采用疼痛视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)^[16]评价疼痛情况,总分 10 分,分数越高说明膝关节疼痛越严重。

拍摄膝关节正侧位以及站立位双下肢全长 X 线片,测量以下指标:(1)分别于术前及术后 6 个月拍摄双下肢全长 X 线片测量髁-膝-踝角(hip knee ankle, 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)评价下肢力线恢复情况, HKA 角为越接近 90° 越标准,而 LDFA 和 MPTA 的正常值范围为 $85^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。(2)术后 6 个月于膝关节正侧位 X 线片测量胫骨平台后倾角(lateral tibia component, LTC)、冠状面胫骨组件角(frontal tibia component, FTC)、冠状面股骨组件角(frontal femoral component, FFC)、矢状面股骨组件角(lateral femoral component, LFC)评价假体位置。

1.5 统计学处理

采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。年龄、病程、BMI、手术时间、术中出血量、术后下床时间、影像学指标、KSS 与 VAS 等符合正态分布的定量资料以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组比较采用成组设计定量资料 t 检验;手术前后比较采用配对设计定量资料 t 检验。两组间各时间点 KSS 评分比较采用重复测量方差分析。性别、侧别等定性资料采用 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

两组患者手术顺利进行,术后伤口 I 期愈合。所有患者获得随访,时间 6~8 (6.5 ± 1.5)个月,均未发现感染、静脉血栓栓塞症、侧副韧带损伤、伸膝装置损伤、假体无菌性松动、假体周围骨折以及机器人辅助特有的并发症,如针道感染和由于放置定位针导致的血管神经损伤等不良事件。

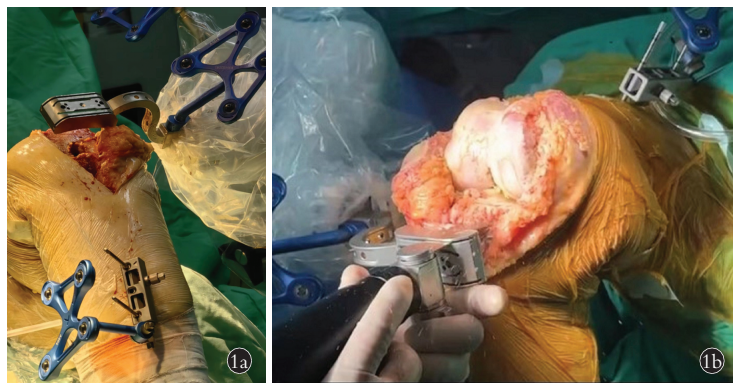


图 1 机器人辅助下术中操作示意图 1a. 机械臂按照术前规划到达指定位置

1b. 术者在截骨导板指引下进行胫骨平台截骨

Fig.1 Schematic diagram of robot-assisted intraoperative 1a. The robotic arm reached the designated position according to the preoperative plan 1b. Tibial plateau osteotomy under the guidance of the osteotomy guide plate

2.1 两组围手术期指标比较

机器人组手术时间和切口长度均长于传统组,差异有统计学意义($P<0.001$);机器人组术中总出血量少于传统组,差异有统计学意义($P<0.001$);机器人组术后下床时间短于传统组,差异有统计学意义($P<0.001$)。见表 2。

2.2 两组术后影像学结果比较

两组患者膝关节畸形均得到改善,冠状位下肢力线均恢复至接近中立位($HKA=180^{\circ}$)。两组术后 6 个月 HKA、LDFA、MPTA 均较术前得到明显改善,差异有统计学意义($P<0.001$),机器人组 HKA 更接近 180° ,优于传统组,差异有统计学意义($P=0.001$)。机器人组 LFC、FFC 优于传统组,差异有统计学意义($P<0.001$)。但术后 6 个月 LDFA、MPTA、LTC 和 FTC 组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。见

表 3。

2.3 两组临床效果比较

两组临床疗效评分结果见表 4、表 5,与术前相比,两组各个随访时间点的膝关节活动度均明显升高,差异有统计学意义($P<0.001$);KSS 均明显升高,差异有统计学意义($P<0.001$);VAS 均明显降低,差异有统计学意义($P<0.001$)。术后 1、3 个月机器人组膝关节活动度优于传统组,差异有统计学意义($t=2.638,2.949;P=0.011,0.005$);但术后 6 个月两组比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。机器人组术后 1、3、6 个月 KSS 及 VAS 均优于传统组,差异有统计学意义($P<0.05$)。典型病例影像学图片见图 2。

3 讨论

3.1 机器人辅助治疗内翻膝在围手术期的优势

机器人辅助治疗减少了术中出血量。本研究机

表 2 两组膝骨关节炎内翻畸形患者围手术期指标比较
Tab.2 Comparison of surgical observation indexes between the two groups of patients with varus knee arthritis

组别	例数	手术时间($\bar{x}\pm s$)/min	切口长度($\bar{x}\pm s$)/cm	术中出血量($\bar{x}\pm s$)/ml	术后下床时间($\bar{x}\pm s$)/h
机器人组	28	109.11±7.16	16.60±2.33	106.93±6.15	17.86±1.84
传统组	31	83.90±7.85	14.47±1.41	147.97±7.62	21.77±2.68
t 值		12.835	4.295	-22.610	-6.475
P 值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表 3 两组膝骨关节炎内翻畸形患者影像学结果比较
Tab.3 Comparison of imaging findings between the two groups of patients with varus knee arthritis

组别	例数	HKA($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$		LDFA($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$		MPTA($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$		术后 6 个月	术后 6 个月	术后 6 个月	术后 6 个月
		术前	术后 6 个月	术前	术后 6 个月	术前	术后 6 个月	LFC($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$	FFC($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$	LTC($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$	FTC($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$
机器人组	28	169.43±4.65	180.39±1.95 ^{a1}	92.27±2.50	89.67±0.63 ^{a3}	78.69±3.58	89.44±0.55 ^{a5}	88.57±1.10	88.96±0.84	87.46±1.35	88.71±1.05
传统组	31	169.81±3.90	178.52±2.23 ^{a2}	91.55±2.45	89.63±0.63 ^{a4}	78.13±4.38	89.29±0.60 ^{a6}	87.16±1.21	87.93±1.09	87.29±1.04	88.58±1.06
t 值		-0.339	3.421	1.126	0.255	0.538	0.947	4.652	4.023	0.559	0.487
P 值		0.736	0.001	0.265	0.799	0.593	0.347	<0.001	<0.001	0.579	0.628

注:HKA,髌-膝-踝角;LFC,矢状面股骨组件角;FFC,冠状面股骨组件角;LTC,胫骨平台后倾角;FTC,冠状面胫骨组件角;LDFA,股骨远端外侧角;MPTA,胫骨近端内侧角。与术前比较,^{a1} $t=-10.886,P=0.000$;^{a2} $t=-11.063,P=0.000$;^{a3} $t=6.210,P=0.000$;^{a4} $t=5.172,P=0.000$;^{a5} $t=-17.046,P=0.000$;^{a6} $t=-14.944,P=0.000$ 。

表 4 两组膝骨关节炎内翻畸形患者不同时间膝关节活动度与 VAS 比较
Tab.4 Comparison of knee mobility and VAS between two groups of patients with varus knee arthritis at different times

组别	例数	膝关节活动度($\bar{x}\pm s$)/ $^{\circ}$				VAS($\bar{x}\pm s$)/分			
		术前	术后 1 个月	术后 3 个月	术后 6 个月	术前	术后 1 个月	术后 3 个月	术后 6 个月
机器人组	28	104.64±10.71	113.32±4.72 ^{b1}	123.93±3.99 ^{b3}	135.36±2.34 ^{b5}	5.500±1.07	3.68±0.67 ^{c1}	2.43±0.79 ^{c3}	0.54±0.64 ^{c5}
传统组	31	104.00±9.09	109.19±6.95 ^{b2}	119.94±6.08 ^{b4}	134.48±2.14 ^{b6}	5.581±1.80	4.16±1.04 ^{c2}	3.03±0.75 ^{c4}	1.42±0.76 ^{c6}
t 值		0.249	2.638	2.949	1.495	-0.206	-2.100	-3.006	-4.792
P 值		0.804	0.011	0.005	0.140	0.838	0.040	0.004	<0.001

注:与术前比较,^{b1} $t=-5.969,P=0.000$;^{b2} $t=-10.856,P=0.000$;^{b3} $t=-10.206,P=0.000$;^{b4} $t=-11.578,P=0.000$;^{b5} $t=-13.895,P=0.000$;^{b6} $t=-17.735,P=0.000$;^{c1} $t=10.200,P=0.000$;^{c2} $t=6.277,P=0.000$;^{c3} $t=13.725,P=0.000$;^{c4} $t=8.496,P=0.000$;^{c5} $t=19.917,P=0.000$;^{c6} $t=13.076,P=0.000$ 。

表 5 两组膝关节炎内翻畸形患者不同时间 KSS 比较

Tab.5 Comparison of Knee Society scores between two groups of patients with varus knee arthritis at different times

组别	例数	疼痛($\bar{x}\pm s$)/分						活动度($\bar{x}\pm s$)/分					
		术前	1 个月	3 个月	6 个月	F 值	P 值	术前	1 个月	3 个月	6 个月	F 值	P 值
机器人组	28	28.79±7.14	37.57±2.78 ^{d1}	40.43±2.73 ^{d3}	41.79±2.51 ^{d5}	44.28	0.000	15.39±3.53	19.50±1.35 ^{e1}	20.79±1.32 ^{e3}	21.46±1.32 ^{e5}	47.99	0.000
传统组	31	27.03±6.11	37.22±2.42 ^{d2}	38.45±2.20 ^{d4}	40.35±2.07 ^{d6}	53.22	0.000	13.39±3.02	18.03±1.17 ^{e2}	18.74±1.06 ^{e4}	19.77±1.20 ^{e6}	57.24	0.000
t 值		1.016	0.511	3.075	2.393			2.352	4.481	6.590	5.148		
P 值		0.314	0.612	0.003	0.020			0.220	0.000	0.000	0.000		

组别	例数	稳定性($\bar{x}\pm s$)/分						总分($\bar{x}\pm s$)/分					
		术前	1 个月	3 个月	6 个月	F 值	P 值	术前	1 个月	3 个月	6 个月	F 值	P 值
机器人组	28	14.46±4.48	18.89±2.20 ^{d1}	20.32±1.91 ^{d3}	21.25±1.71 ^{d5}	30.87	0.000	58.64±14.44	75.96±3.96 ^{e1}	81.53±3.78 ^{e3}	84.50±3.29 ^{e5}	102.96	0.000
传统组	31	13.23±2.73	18.19±1.51 ^{d2}	18.97±1.60 ^{d4}	19.74±1.75 ^{d6}	68.49	0.000	53.645±11.72	73.77±4.18 ^{e2}	76.48±3.60 ^{e4}	80.19±3.28 ^{e6}	96.86	0.000
t 值		1.297	1.434	2.963	3.338			1.466	2.062	5.263	5.025		
P 值		0.200	0.157	0.004	0.001			0.148	0.044	0.000	0.000		

注：与术前比较，^{d1}t=-6.777, P=0.000; ^{d2}t=-9.553, P=0.000; ^{d3}t=-8.918, P=0.000; ^{d4}t=-10.719, P=0.000; ^{d5}t=-9.622, P=0.000; ^{d6}t=-11.966, P=0.000; ^{e1}t=-5.803, P=0.000; ^{e2}t=-8.668, P=0.000; ^{e3}t=-8.179, P=0.000; ^{e4}t=-9.810, P=0.000; ^{e5}t=-9.334, P=0.000; ^{e6}t=-12.048, P=0.000; ^{f1}t=-5.387, P=0.000; ^{f2}t=-10.012, P=0.000; ^{f3}t=-7.221, P=0.000; ^{f4}t=-11.754, P=0.000; ^{f5}t=-8.457, P=0.000; ^{f6}t=-13.054, P=0.000; ^{g1}t=-6.324, P=0.000; ^{g2}t=-9.813, P=0.000; ^{g3}t=-8.624, P=0.000; ^{g4}t=-11.325, P=0.000; ^{g5}t=-9.856, P=0.000; ^{g6}t=-13.127, P=0.000。

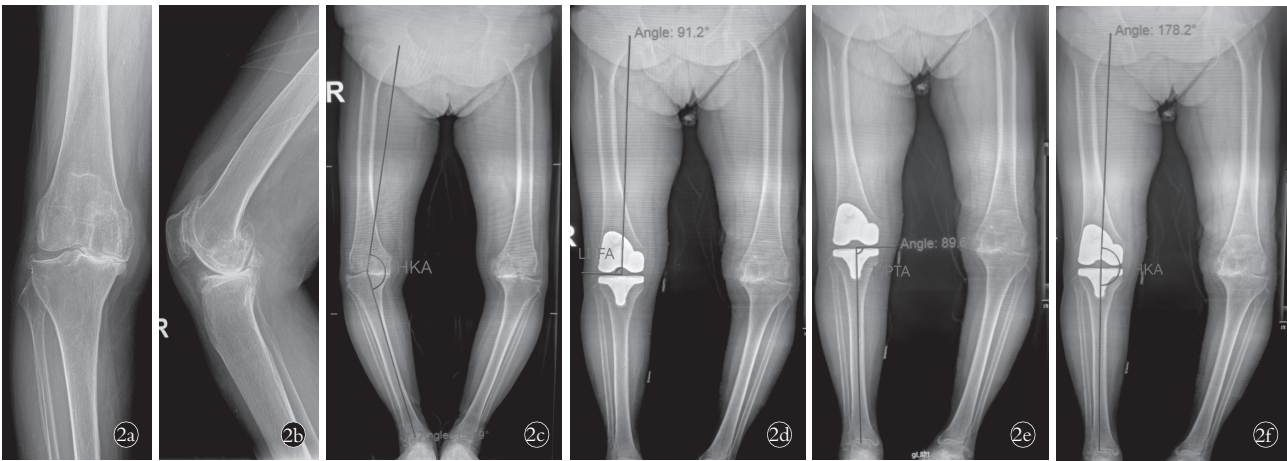


图 2 患者,女,74 岁,双侧膝骨关节炎 2a,2b. 术前右侧膝关节正侧位 X 线片示膝关节间隙严重狭窄,边缘有骨赘形成 2c. 术前双下肢全长 X 线片示双膝严重内翻,右侧内翻约为 24°,关节间隙变窄 2d,2e,2f. 术后 3 d 双下肢全长 X 线片示右侧假体位置良好,LDFA 为 91.2°,MPTA 为 89.6°,右下肢冠状面力线 178.2°

Fig.2 A 74-year-old female patient, bilateral knee osteoarthritis 2a,2b. Before operation AP and lateral X-ray films of right knee joint plate showed severe stenosis in the gap between the right knee joint and osteogenesis on the edge of the patient 2c. Before operation, the total length of both lower limbs X-ray showed severe introversion of both knees, and the right introversion was about 24°, and the joint gap became narrower 2d,2e,2f. Three days after surgery, the total length of the double lower extremity X-rays showed that the position of the right prosthesis was good, the LDFA was 91.2°, the MPTA was 89.6°, and the coronary force line of the right lower limb was 178.2°

机器人组手术时间较传统组长可能与术中需在股骨与胫骨进行定位和骨注册、手术步骤衔接、助手配合等因素有关。同时,机器人组需要安放胫骨侧及股骨侧定位器,还需要通过不断的旋转股骨从而确定股骨头的中心,完成股骨侧及胫骨侧注册。学习曲线也是

影响手术时间的重要因素之一,何锐等^[17]的研究结果表明手术熟练程度是影响手术时间的重要因素。本研究还发现,机器人组术中失血量少于传统手术组,其原因在于机器人组采用髓外定位取代了传统的股骨髓内定位,无髓内定位杆的插入减少了髓腔

内出血,再加上机器人组无须进行股骨髁间截骨,进一步减少了术中出血。其次,机械手臂可以按照系统指令进行精准截骨,不进行内侧软组织过度松解,有限的松解仅限于显露骨赘,避免了术中进行过度的软组织松解,降低截骨区域以外的骨及侧副韧带等软组织的损伤,减少了小静脉及毛细血管出血,从而进一步减少术中的出血量。

3.2 机器人组能更好地重建内翻畸形患者的下肢力线和更准确的假体位置

改善 TKA 中的下肢对线和假体位置是确保患者术后功能满意和假体存活的重要因素^[18-19]。尽管到目前为止,TKA 术后的肢体轴线和假体位置还没有明确的标准,但大多数外科医生认为,将下肢对齐恢复到中性(180° 附近)是最合适的^[20]。文献^[21-22]报道,当假体位置和下肢对齐偏离中立方向 $>3^\circ$ 时,TKA 手术的失败率和翻修率显著增加。传统 TKA 中,股骨远端切采用髓内引导系统,胫骨近端切采用髓外引导系统,这高度依赖于操作者的经验,10%~20%的患者对手术结果不满意,这可能与假体错位和下肢对准不良有关^[23]。本研究^[24]结果表明,两种手术方式均可纠正患者术前内翻畸形,从术后的影像学指标来看,机器人组可以更好地将肢体力线纠正至中立位,HKA 更加接近 180° 。有研究指出,对于术前合并内翻畸形的膝关节炎患者,TKA 术后冠状面下肢力线残留轻度内翻畸形并不会造成不良结局,甚至术后残留轻度内翻畸形患者的膝关节功能较纠正至中立位者更好。两组均能使股骨远端截骨线在冠状面垂直于股骨机械轴,胫骨近端截骨线垂直于胫骨机械轴(胫骨解剖轴),都能保证 LDFA、MPTA 接近 90° ,但两组之间的角度数值差异无统计学意义,这可能是因为机器人辅助 TKA 在进行股骨远端截骨时是参考 CT 数据在冠状面上以股骨头旋转中心与膝关节中心连线来确定下肢力线,与传统 TKA 参考下肢全长 X 线片来确定下肢力线的原理一样,均要求截骨线垂直于股骨机械轴。在胫骨近端截骨时,机器人辅助 TKA 术中使用钝头靶标定位内外踝,目的是确定踝关节中心,这个过程也与传统 TKA 中的髓外定位技术类似,在孙茂淋等^[25]的研究中也提到这点。但笔者还观察到机器人组将 LDFA 纠正到正常范围内($85^\circ\sim 90^\circ$)的数量多于传统组,这是否从侧面说明机器人辅助下的股骨侧力线纠正率优于传统组,还有待进一步研究。

在假体位置方面,与传统组相比,机器人组不能有效改善膝关节假体的位置^[26],这与笔者的研究结果不一致。笔者的研究结果表明,机器人组可明显改善内翻畸形患者的假体在股骨端矢状位与冠状位的

位置,使其更加接近 90° ,但这种差异在胫骨侧却不存在,这造成这种差异的原因可能与传统膝关节置换术前针对存在内翻畸形患者是通过人工测量的股骨解剖轴线与下肢机械轴线的夹角角度,按照经验来确定髓腔开髓点,然后用力线杆进行髓内定位截骨,涉及因素众多,更容易出现偏差有关。

3.3 机器人组较传统组能获得更好的临床疗效

迄今为止,关于机器人辅助和传统 TKA 在改善术后功能方面的有效性已有许多研究报道,但结论却互相矛盾。LI 等^[27]发现机器人组和传统组在术后关节活动度和膝关节功能评分方面差异无统计学意义。然而,KHLOPAS 等^[28]和 MARCHAND 等^[29]表明,机器人组相比传统组可以获得更好的活动度和膝关节功能,这与笔者针对内翻畸形患者所做的研究结果一致。现有的关于膝关节置换手术和尸体研究表明,机器人辅助 TKA 可保护膝关节周围的软组织,并可优化膝关节暴露,从而带来更小的软组织损伤^[30-32],而内翻膝的患者大部分情况下都会因为前交叉韧带结构和功能的失效导致胫骨平台内后方明显增生,进行传统手术时,通常会利用骨刀或摆锯切除该增生部分,这就进一步加大了软组织创伤程度。针对内翻膝患者,可以在术前进行个性化的截骨规划,避免传统手术中的肉眼和垫块对间隙的测量,减少误差,可以提前预见并评估术后的疗效。另有研究证明机器人手术在术中对软组织和骨的保护可以进而改善患者的术后疼痛,并减少了阿片类药物的使用^[33-34],这与本研究结果一致。两组早期疼痛程度的差异使患者在术后早期功能锻炼方面产生了巨大影响,机器人组患者术后疼痛程度低,下床时间快,膝关节锻炼活动时间早,所以在早期随访中会表现为机器人组活动度优于传统组。但随着时间的推移,这种疼痛差异逐渐缩小,到中后期时,两组患者的活动度趋于一致。这就说明机器人组较传统组在治疗膝内翻患者时能获得更好的早期临床疗效。

本研究两组均未出现严重并发症和其他术后不良事件,理论上机器人手术需要在股骨和胫骨开髓,从而造成额外的损伤,但是目前研究表明,机器人辅助 TKA 并不会造成额外的特异性并发症^[35],同时目前尚未有研究发现机器人辅助 TKA 术后感染率高于传统 TKA。这说明 TKA 机器人在术后的短期不良事件发生率方面的安全性,但也仍需长期的随访观察来进一步证实这一结论。

本研究仍存在一定局限性,首先,不能消除本研究中样本量较小对结果的影响;其次,本研究仅对患者进行了短期随访观察机器人辅助 TKA 的长期疗效尚不清楚;最后,术者前期在机器人辅助 TKA 上

投入了大量的时间和成本,可以通过术前影像学资料更加了解术中存在的重点、难点,从而制定更加详尽的手术计划,这个因素可能也会影响研究的结果。

综上所述,机器人辅助 TKA 是一种安全有效的全膝关节置换术系统。与传统组相比,机器人组对术前存在内翻畸形的患者可以帮助他们获得更好的肢体轴线和假体对位,从而获得更好的临床和影像效果。机器人辅助 TKA 是否具有比传统外科技术更好的远期放射学和临床疗效,还需进一步研究。

利益冲突:所有作者声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] 周洪保,张曦,吕正祥. 膝关节骨性关节炎治疗进展[J]. 中医药导报,2012,18(2):87-89.
- ZHOU H B,ZHANG X,LU Z X. The treatment of knee osteoarthritis progression[J]. Guid J Tradit Chin Med Pharm,2012,18(2):87-89. Chinese.
- [2] GERSING A S,SCHWAIGER B J,HEILMEIER U,et al. Evaluation of chondrocalcinosis and associated knee joint degeneration using MR imaging:data from the osteoarthritis initiative[J]. Eur Radiol, 2017,27(6):2497-2506.
- [3] SHERMAN S L,THOMPSON S F,CLOHISY J C F. Distal femoral varus osteotomy for the management of valgus deformity of the knee [J]. J Am Acad Orthop Surg, 2018,26(9):313-324.
- [4] KFURI M,LOBENHOFFER P. High tibial osteotomy for the correction of Varus knee deformity[J]. J Knee Surg,2017,30(5):409-420.
- [5] COLLEONI J L,RIBEIRO F N,MOS P A C,et al. Venous thromboembolism prophylaxis after total knee arthroplasty (TKA): aspirin vs. rivaroxaban[J]. Rev Bras Ortop, 2018,53(1):22-27.
- [6] LAN R H,BELL J W,SAMUEL L T,et al. Evolving outcome measures in total knee arthroplasty:trends and utilization rates over the past 15 years[J]. J Arthroplasty, 2020,35(11):3375-3382.
- [7] ABDEL M P,OUSSEDIK S,PARRATTE S,et al. Coronal alignment in total knee replacement:historical review,contemporary analysis, and future direction[J]. Bone Joint J, 2014,96-B(7):857-862.
- [8] ZHAO M W,WANG L,ZENG L,et al. Effect of femoral resection on coronal overall alignment after conventional total knee arthroplasty [J]. Chin Med J, 2016,129(21):2535-2539.
- [9] ANTONIOS J K,KORBER S,SIVASUNDARAM L,et al. Trends in computer navigation and robotic assistance for total knee arthroplasty in the United States:an analysis of patient and hospital factors[J]. Arthroplast Today, 2019,5(1):88-95.
- [10] KIM Y H,YOON S H,PARK J W. Does robotic-assisted TKA result in better outcome scores or long-term survivorship than conventional TKA? A randomized,controlled trial[J]. Clin Orthop Relat Res, 2020,478(2):266-275.
- [11] NAZIRI Q,CUSSON B C,CHAUDHRI M,et al. Making the transition from traditional to robotic-arm assisted TKA:what to expect? A single-surgeon comparative-analysis of the first-40 consecutive cases[J]. J Orthop, 2019,16(4):364-368.
- [12] LIOW M H,XIA Z,WONG M K,et al. Robot-assisted total knee arthroplasty accurately restores the joint line and mechanical axis. A prospective randomised study[J]. J Arthroplasty, 2014,29(12):2373-2377.
- [13] 夏润之,童志成,张经纬,等. 国产“鸿鹄”膝关节置换手术机器人的早期临床研究[J]. 实用骨科杂志, 2021,27(2):108-113,117.
- XIA R Z,TONG Z C,ZHANG J W,et al. Early clinical study of domestic "skywalker" surgical robot for knee arthroplasty[J]. J Pract Orthop, 2021,27(2):108-113,117. Chinese.
- [14] KELLGREN J H,LAWRENCE J S. Radiological assessment of osteo-arthritis[J]. Ann rheum dis, 1957,16(4):494-502.
- [15] INSALL J N,DORR L D,SCOTT R D,et al. Rationale of the Knee Society clinical rating system[J]. Clin Orthop Relat Res, 1989(248):13-14.
- [16] 曾俊杰,马立峰,赵嘉铭,等. 股骨后髁偏心距变化对全膝关节置换术后功能恢复的预测价值[J]. 中华骨科杂志, 2020,40(15):1011-1018.
- ZENG J J,MA L F,ZHAO J M,et al. The effects of posterior condylar offset on functional recovery after total knee arthroplasty [J]. Chin J Orthop, 2020,40(15):1011-1018. Chinese.
- [17] 何锐,孙茂淋,熊然,等. 机器人辅助膝关节置换的近期疗效与学习曲线[J]. 陆军军医大学学报, 2022,44(5):476-483.
- HE R,SUN M L,XIONG R,et al. Short-term efficacy and learning curve of robot-assisted total knee arthroplasty[J]. J Third Mil Med Univ, 2022,44(5):476-483. Chinese.
- [18] BOURNE R B,CHESWORTH B M,DAVIS A M,et al. Patient satisfaction after total knee arthroplasty:who is satisfied and who is not[J]. Clin Orthop Relat Res, 2010,468(1):57-63.
- [19] MATSUDA S,KAWAHARA S,OKAZAKI K,et al. Postoperative alignment and ROM affect patient satisfaction after TKA[J]. Clin Orthop Relat Res, 2013,471(1):127-133.
- [20] PARRATTE S,PAGNANO M W,TROUSDALE R T,et al. Effect of postoperative mechanical axis alignment on the fifteen-year survival of modern, cemented total knee replacements[J]. J Bone Joint Surg Am, 2010,92(12):2143-2149.
- [21] YEN S H,LIN P C,WANG J W. Comparison of the radiographic outcomes and total blood loss between pinless navigation and conventional method in minimally invasive total knee arthroplasty[J]. J Orthop Surg Res, 2023,18(1):254.
- [22] LONDHE S B,SHETTY S,VORA N L,et al. Efficacy of the pre-operative three-dimensional (3D) CT scan templating in predicting accurate implant size and alignment in robot assisted total knee arthroplasty[J]. Indian J Orthop, 2022, 56(12):2093-2100.
- [23] YANG H Y,SEON J K,SHIN Y J,et al. Robotic total knee arthroplasty with a cruciate-retaining implant:a 10-year follow-up study [J]. Clin Orthop Surg, 2017,9(2):169-176.
- [24] SCHIFFNER E,WILD M,REGENBRECHT B,et al. Neutral or natural? Functional impact of the coronal alignment in total knee arthroplasty[J]. J Knee Surg, 2019,32(8):820-824.
- [25] 孙茂淋,杨柳,郭林,等. 手术机器人辅助人工全膝关节置换术改善股骨旋转对线及早期疗效研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2021,35(7):807-812.
- SUN M L,YANG L,GUO L,et al. Effect of robotic-arm assisted total knee arthroplasty on femoral rotation alignment and its short-term effectiveness[J]. Chin J Reparative Reconstr Surg, 2021,35(7):807-812. Chinese.
- [26] JEON S W,KIM K I,SONG S J. Robot-assisted total knee arthro-

- plasty does not improve long-term clinical and radiologic outcomes [J]. *J Arthroplasty*, 2019, 34(8):1656–1661.
- [27] LI Z, CHEN X, WANG X Q, et al. HURWA robotic-assisted total knee arthroplasty improves component positioning and alignment-A prospective randomized and multicenter study[J]. *J Orthop Translat*, 2022, 33:31–40.
- [28] KHLOPAS A, SODHI N, HOZACK W J, et al. Patient-reported functional and satisfaction outcomes after robotic-arm-assisted total knee arthroplasty: early results of a prospective multicenter investigation[J]. *J Knee Surg*, 2020, 33(7):685–690.
- [29] MARCHAND R C, SODHI N, KHLOPAS A, et al. Patient satisfaction outcomes after robotic arm-assisted total knee arthroplasty: a short-term evaluation[J]. *J Knee Surg*, 2017, 30(9):849–853.
- [30] HAMPP E L, SODHI N, SCHOLL L, et al. Less iatrogenic soft-tissue damage utilizing robotic-assisted total knee arthroplasty when compared with a manual approach: a blinded assessment[J]. *Bone Joint Res*, 2019, 8(10):495–501.
- [31] KAYANI B, KONAN S, PIETRZAK J R T, et al. Iatrogenic bone and soft tissue trauma in robotic-arm assisted total knee arthroplasty compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: a prospective cohort study and validation of a new classification system[J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33(8):2496–2501.
- [32] KAYANI B, FONTALIS A, HADDAD I C, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with comparable functional outcomes but improved forgotten joint scores compared with conventional manual total knee arthroplasty at five-year follow-up[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(12):5453–5462.
- [33] BHIMANI S J, BHIMANI R, SMITH A, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty demonstrates decreased postoperative pain and opioid usage compared to conventional total knee arthroplasty[J]. *Bone Jt Open*, 2020, 1(2):8–12.
- [34] ALSHATWI R, ALFADHEL S, ALRASHEED M, et al. Comparison of postoperative pain and function in robotic total knee arthroplasty and conventional total knee arthroplasty amongst patients at king fahad medical city in Riyadh, Saudi Arabia[J]. *Cureus*, 2023, 15(3):e36285.
- [35] BATAILLER C, FERNANDEZ A, SWAN J, et al. MAKO CT-based robotic arm-assisted system is a reliable procedure for total knee arthroplasty: a systematic review[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2021, 29(11):3585–3598.

(收稿日期:2024-01-06 本文编辑:朱嘉)