

机器人辅助后交叉韧带重建术治疗后交叉韧带损伤的临床疗效研究

鞠超杰, 于洪文, 郝松楠, 张伟, 项金香, 梁秀玉, 韩延龙, 刘志佳

(哈尔滨市第五医院骨科 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 目的: 旨在评估机器人辅助后交叉韧带 (PCL) 重建术治疗 PCL 损伤的临床疗效。**方法:** 选取 2021 年 9 月—2023 年 10 月于哈尔滨市第五医院骨科治疗的 27 例 PCL 损伤患者作为研究对象, 按照随机数字表法将其分为试验组 (机器人辅助下 PCL 重建术, $n=14$) 和对照组 (传统 PCL 重建术, $n=13$)。比较两组手术时间、切口长度、失血量、住院时间、膝关节功能及恢复情况、胫骨隧道内口的变化情况。**结果:** 两组患者的手术时间和切口长度相比, 差异无统计学意义 ($P>0.05$)。与对照组相比, 试验组术中失血量更少、住院时间更短以及下地时间更早 ($P<0.05$)。此外, 术后 3 个月和术后 1 年, 试验组患者的膝关节后向松弛问题较对照组更少, Lysholm 评分和膝关节活动度均优于对照组 ($P<0.001$), 试验组较对照组的胫骨后移程度低, 但差异无统计学意义 ($P>0.05$)。术后一年, 试验组患者的胫骨隧道内口变化情况优于对照组 ($P<0.05$)。**结论:** 机器人辅助手术在 PCL 重建术中表现出明显优势, 患者获益较大, 具有一定的临床推广价值。

关键词 后交叉韧带损伤; 机器人辅助手术; 膝关节重建

中图分类号 R684.7 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2025) 02-0205-06

Clinical efficacy of robot-assisted posterior cruciate ligament reconstruction in the treatment of posterior cruciate ligament injury

JU Chaojie, YU Hongwen, HAO Songnan, ZHANG Wei, XIANG Jinxiang, LIANG Xiuyu, HAN Yanlong, LIU Zhijia

(Department of Orthopedics, Harbin Fifth Hospital, Harbin 150040, China)

Abstract Objective: To evaluate the clinical efficacy of robot-assisted posterior cruciate ligament (PCL) reconstruction in the treatment of PCL injury. **Methods:** 27 patients with PCL injury from September 2021 to October 2023 in Harbin Fifth Hospital were selected and divided into the study group (robot-assisted PCL reconstruction, $n=14$) and the control group (traditional PCL reconstruction, $n=13$) using the random number table method. The operative time, incision length, blood loss, length of hospital stay, knee function and recovery, and changes of the internal tibial tunnel were compared between the two groups of patients. **Results:** There was no significant difference in operative time and incision length between the two groups ($P>0.05$). Compared with the control group, the study group had less intraoperative blood loss, shorter length of hospital stay and earlier time to get off the bed ($P<0.05$). In addition, at 3 months and 1 year after surgery, patients in the study group had fewer problems with posterior knee laxity, and better Lysholm scores and knee mobility than those in the control group ($P<0.001$), and the study group had less posterior tibial displacement than the control group, but the difference was not statistically significant ($P>0.05$). At 1 year after surgery, the changes of the internal tibial tunnel in the study group were better than those in the control group ($P<0.05$). **Conclusion:** Robot-assisted surgery has demonstrated significant advantages in PCL reconstruction, with greater patient benefit, and has certain clinical promotion value.

Key words Posterior Cruciate Ligament Injury; Robot-assisted Surgery; Knee Reconstruction; Clinical Efficacy

基金项目: 黑龙江省卫生健康委科研课题 (20210404070137)

Foundation Item: Heilongjiang Provincial Health Commission Scientific Research Project(20210404070137)

引用格式: 鞠超杰, 于洪文, 郝松楠, 等. 机器人辅助后交叉韧带重建术治疗后交叉韧带损伤的临床疗效研究 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2025, 6(2): 205-209, 216.

Citation: JU C J, YU H W, HAO S N, et al. Clinical efficacy of robot-assisted posterior cruciate ligament reconstruction in the treatment of posterior cruciate ligament injury[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(2): 205-209, 216.

通讯作者 (Corresponding Author): 鞠超杰 (JU Chaojie), Email: 287789984@qq.com

后交叉韧带 (Posterior Cruciate Ligament, PCL) 是膝关节最强韧的韧带, 主要由较大的前外侧束和较小的后内侧束组成。在股侧, 前外侧束从滑车点延伸至切迹顶部的内侧弓点, 后内侧束从内侧弓点延伸至关节软骨最后方的内侧壁, 它们具有负荷分担、协同和共同支配的关系, 在膝关节稳定性中起着重要作用^[1-5]。PCL 损伤是较为常见的膝关节损伤, 通常与前交叉韧带、内侧副韧带、后外侧角和半月板撕裂有关。在接受非手术治疗的急性孤立性 I 级或 II 级 PCL 损伤中, PCL 具有自愈潜力。而对于严重的 PCL 损伤以及多发韧带损伤, PCL 重建是标准治疗方法, 其在临床症状、功能评分和膝关节后部松弛度方面有显著改善^[6-10]。近年来, 机器人辅助技术在膝关节手术中的应用逐渐增多, 展现出提高手术精度和促进术后膝关节功能恢复的潜力, 其操作更加直观, 有助于减少术中失误^[11-16]。然而目前关于机器人辅助下 PCL 重建术的相关研究较少。因此, 本研究旨在探讨机器人辅助技术在 PCL 重建术中的应用效果, 为 PCL 损伤的最佳治疗方法提供临床依据, 进一步验证机器人辅助手术在提高手术精度和加速康复方面的潜在优势。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析 2021 年 9 月—2023 年 10 月哈尔滨市第五医院收治的 27 例 PCL 损伤患者的临床资料。纳入标准: ①存在明显外伤史, 且病程不超过 14 d; ②后抽屉试验、股四头肌肌力试验、胫骨后沉试验显示为阳性, 影像学检查显示 PCL 断裂, 符合 PCL 损伤的诊断标准; ③患者接受机器人辅助 PCL 重建术并完成治疗效果评估检查; ④患者病例资料完整; ⑤本研究获得患者及其家属同意, 签署知情同意书。排除标准: ①合并半月板损伤或其他韧带损伤的患者; ②具有脏器功能障碍或者心

肺功能不全无法耐受手术者; ③妊娠期或哺乳期女性; ④既往有膝关节手术史者; ⑤伴有认知障碍或精神疾病的患者; ⑥存在手术禁忌症不适合进行手术的患者。患者在入组时通过计算机生成的随机数字表进行分组, 由第三方人员完成随机化过程, 将患者分为试验组 (机器人辅助下 PCL 重建术, $n=14$) 和对照组 (传统 PCL 重建术, $n=13$)。本研究采用双盲设计避免手术医生和患者对分组情况的知情偏差, 患者在术后评估中也未被告知其所接受的治疗方法, 确保研究结果不受手术医生或患者主观意识的影响。两组患者一般资料比较, 差异无统计学意义 ($P>0.05$), 具有可比性 (见表 1)。

1.2 手术方法

1.2.1 对照组 患者接受传统 PCL 重建术。首先, 患者全身麻醉后取仰卧位, 膝关节放松并固定, 并再次进行抽屉试验确认患者 PCL 损伤。随后, 建立膝关节前内侧、前外侧关节镜入路, 切口贴近髌腱边缘 2 mm 处, 探查关节内结构。其次建立骨隧道, 使用胫骨隧道导向定位器定位胫骨外口于胫骨平台下 3~4 cm、胫骨结节内下 1 cm 处, 内口定位于 PCL 胫骨附着处, 沿定位针钻出胫骨隧道, 尽可能保留 PCL 残端。股骨隧道采用 inside-out 方法, 隧道中心定位于关节软骨后方 6~8 mm 处, 左膝为一点半方向, 右膝为十点半方向。使用 LARS 人工韧带作为移植物, 移植物通过股骨隧道后使用 LARS 人工韧带专用固定螺钉固定其股骨端, 然后, 屈伸膝关节 $0^{\circ}\sim 130^{\circ}$, 重复 20 次, 确保移植物长度变化小于 2 mm。在屈膝 90° 前抽屉位时, 使用 LARS 人工韧带专用固定螺钉固定移植物的胫骨游离端^[17-21]。

1.2.2 试验组 患者接受机器人辅助下 PCL 重建术。患者全身麻醉后, 常规消毒铺无菌单, 关节镜常规入路, 处理半月板损伤等关节内病变处, 然后使用 C 形臂 X 线机获取膝关节术中影像, 固定患者示踪器于胫骨远端。具体步骤为将天玑[®]骨科手术机器人置于手术床旁, 确保机械臂有足够的操作空间, 并使用无菌罩覆盖手术区, 光学跟踪相机置于患肢头端, 同步配套的 C 形臂 X 线机置于膝关节处。然后, 使用 C 形臂 X 线机采集影像并传输至机器人工作站进行配准计算, 在工作站内规划胫骨导针的导向路径, 确保路径从胫骨结节内侧延伸至 PCL 的解剖止点 (如图 1A)。随后, 机械臂在系统控制下移

表 1 两组患者一般资料比较 ($\bar{x}\pm s$)

Table 1 Comparison of general data between the two groups of patients ($\bar{x}\pm s$)

指标	对照组 ($n=13$)	试验组 ($n=14$)	P 值
年龄 (岁)	28.50 ± 8.90	29.50 ± 7.60	0.789
性别 (男/女)	8/5	9/5	0.876
BMI (kg/m^2)	22.80 ± 2.70	23.60 ± 1.90	0.453
侧别 (右/左)	9/4	9/5	0.786

动至规划位置,通过导向套筒定位导针。导针置入后,通过X线透视确认隧道位置与角度,并使用钻头建立8 mm的胫骨隧道(如图1B~D),股骨隧道通过关节镜辅助建立。之后,使用人工LARS韧带作为移植物并通过骨隧道置入膝关节,使用LARS人工韧带专用固定螺钉固定移植物的股骨端,韧带在 $0^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 屈伸范围内长度变化小于2 mm时,以LARS人工韧带专用固定螺钉固定胫骨端。

两组患者术后2~3 d定期检查创口进行换药,局部使用抗炎药物,并制定术后康复计划,包括早期膝关节功能训练,逐步恢复屈伸功能,避免过早完全负重。

1.3 观察指标 ①收集两组患者围手术期指标,包括手术时间、切口长度、住院时间、失血量和下地时间。②记录患者术前、术后3个月及术后1年的Lysholm评分、VAS评分、后抽屉试验结果和膝关节活动度,评价患者术后的膝关节功能及恢复情况。Lysholm评分用于全面评估患者膝关节的功能,评分标准包括疼痛(25分)、稳定性(25分)、功能(25分)、肿胀(10分)、拐杖使用(10分)、跪下及跑步能力(5分),总分90~100分为膝关节功能极好,80~89分为良好,70~79分为中等,60~69分为较差,50分以下为膝关节功能差。VAS评分用于定量评估患者疼痛强度,评分范围为0~10分,0分为无痛,10分为最剧烈的疼痛。后抽屉试验用于评估患者膝关节PCL的稳定性,分为四个分级:正常表现为膝关节后移不超过1~2 mm;轻度损伤表现为膝关节后移3~5 mm,关节稳定性略有下降;中度损伤表现为

膝关节后移6~10 mm,关节明显松动;重度损伤表现为膝关节后移超过10 mm。膝关节活动度评估患者膝关节屈伸运动是否受限,正常膝关节屈曲度为 $135^{\circ}\sim 145^{\circ}$,完全伸展为 0° ,任何屈伸范围的受限都可能影响患者的运动能力。③根据术后影像学检查记录患者胫骨隧道内口的变化情况。

1.4 统计学方法 所有数据均采用SPSS 16.0软件进行统计学分析。采用Shapiro-Wilk检验对连续性变量的数据进行正态性检验。符合正态分布的数据使用均数 \pm 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,组间比较采用独立样本 t 检验;不符合正态分布的数据使用中位数(四分位数间距) $[M(P25, P75)]$ 表示,组内比较采用Mann-Whitney U 检验,组间比较采用 χ^2 检验。 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 围手术期指标 两组患者的手术时间和切口长度相比,差异无统计学意义($P>0.05$)。试验组患者的术中失血量显著低于对照组,且住院时间更短,下地时间更早,差异有统计学意义($P<0.05$),见表2。

2.2 膝关节功能及恢复情况 术前,两组患者的Lysholm评分、VAS评分、后抽屉试验结果和膝关节活动度无显著差异($P>0.05$)。术后3个月和术后1年的随访结果显示,在后抽屉试验中,试验组与对照组相比,表现为更少的膝关节后向松弛问题,差异有统计学意义($P<0.001$)。术后3个月和术后1年,试验组Lysholm评分及膝关节活动度显著高于对照组,差异有统计学意义($P<0.001$),但两组VAS

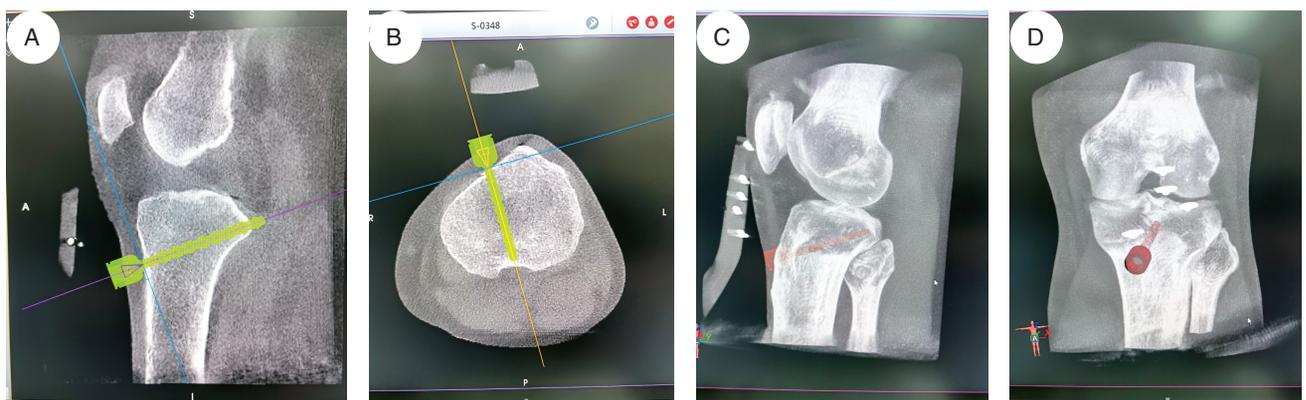


图1 术中韧带重建定位

Figure 1 Positioning for intraoperative ligament reconstruction

注: A. 膝关节矢状位确定关节内PCL解剖止点位置; B. 轴位确定PCL重建胫骨隧道开口位置,胫骨结节内侧10 mm水平; C. 三维重建图像确定重建PCL胫骨隧道位置及隧道倾斜角; D. 冠状位确定重建PCL胫骨隧道角度

评分相比, 差异无统计学意义 ($P>0.05$), 见表 3。

2.3 影像学评估 与术前相比, 术后两组患者的胫骨后移程度均降低, 差异有统计学意义 ($P<0.001$)。术后 3 个月和术后 1 年, 试验组较对照组的胫骨后移程度较低, 但差异无统计学意义 ($P>0.05$)。在胫骨隧道内口的变化方面, 术后 1 年试验组有 14 例患者表现为隧道缩小, 而对照组有 9 例患者表现为隧道缩小、2 例无变化、2 例扩大, 组间比较差异有统计学意义 ($P<0.05$), 见表 4。

3 讨论

PCL 是膝关节中最重要的结构之一, 具有维持膝关节后方稳定的功能^[22-23]。多数情况下 PCL 损伤

常伴随着其他韧带、半月板或软组织的损伤, PCL 重建术被认为是严重 PCL 损伤的标准治疗方法, 尤其在保守治疗效果不佳或伴有多发性韧带损伤的情况下^[24-29]。随着科学技术的不断进步, 机器人辅助技术在膝关节手术中逐步得到应用, 尤其在复杂的韧带重建术中表现出显著潜力。

本研究中, 机器人辅助 PCL 重建术显著减少了术中失血量, 这可能与机器人辅助手术可以提高手术精准度、减少手术操作误差有关。机器人系统在图像引导下, 可以精准地确定骨隧道的最佳位置和角度, 从而避免了传统手术中因操作不当而导致的出血。这与先前的研究结果一致, 表明机器人辅助

表 2 两组患者围手术期指标比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of perioperative indicators between the two groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

指标	对照组 ($n=13$)	试验组 ($n=14$)	t 值	P 值
手术时间 (min)	65.20 ± 15.80	72.30 ± 14.20	1.230	0.340
术中失血量 (mL)	9.10 ± 1.40	7.20 ± 1.60	2.473	0.011
切口长度 (cm)	8.90 ± 1.60	7.60 ± 1.50	1.753	0.091
住院时间 (d)	8.20 ± 1.30	7.10 ± 1.20	2.087	0.048
下地时间 (d)	4.30 ± 1.30	3.10 ± 1.40	2.213	0.035

表 3 两组患者膝关节功能及恢复情况比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Comparison of knee function and recovery between the two groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

随访指标	对照组 ($n=13$)	试验组 ($n=14$)	t/χ^2 值	P 值
后抽屉试验 (正常 / 轻度损伤 / 中度损伤 / 重度损伤)				
术前	0/0/3/10	0/0/2/12	0.172	0.679
术后 3 个月	11/2/0/0	14/0/0/0	2.334	<0.001
术后 1 年	10/3/0/0	13/1/0/0	1.367	<0.001
Lysholm 评分				
术前	52.80 ± 4.90	53.90 ± 4.40	0.614	0.543
术后 3 个月	84.90 ± 6.20 ^a	90.60 ± 4.50 ^a	4.196	<0.001
术后 1 年	88.40 ± 4.30 ^a	92.50 ± 2.90 ^a	4.351	<0.001
膝关节活动度 (°)				
术前	35.20 ± 2.40	36.30 ± 1.90	1.046	0.312
术后 3 个月	119.30 ± 4.20 ^a	125.60 ± 5.40 ^a	3.365	<0.001
术后 1 年	134.60 ± 5.40 ^a	137.70 ± 4.50 ^a	3.212	<0.001
VAS 评分				
术前	8.10 ± 1.30	7.90 ± 1.40	0.397	0.685
术后 3 个月	2.60 ± 0.90 ^a	2.50 ± 0.40 ^a	0.377	0.815
术后 1 年	2.20 ± 0.30 ^a	2.10 ± 0.90 ^a	0.391	0.762

注: 与术前相比, ^a $P<0.05$

表 4 两组患者影像学指标比较 ($\bar{x} \pm s$)
Table 4 Comparison of imaging indicators between the two groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

指标	对照组 (n=13)	试验组 (n=14)	t/ χ^2 值	P 值
胫骨后移程度 (mm)				
术前	16.80 ± 3.30	17.50 ± 3.40	0.442	0.672
术后 3 个月	4.60 ± 2.00 ^a	4.10 ± 0.80 ^a	0.846	0.732
术后 1 年	4.90 ± 2.30 ^a	4.60 ± 2.50 ^a	0.313	0.762
术后 1 年胫骨隧道内口变化				
缩小 / 无变化 / 扩大	9/2/2	14/0/0	3.962	0.046

注：与术前相比，^aP<0.001

手术能够更好地控制出血，减少患者术中的不必要损伤^[30]。此外，与对照组相比，试验组在住院时间和下地时间方面也表现出了显著的优势。机器人辅助手术通过精确的手术定位，减少了软组织损伤，加速了术后恢复进程。尤其在术后早期，患者可以更早地进行负重活动，进而有助于膝关节的功能恢复。相比之下，传统手术由于操作中可能存在较大的创伤，导致患者的恢复时间和住院时间较长。在术后膝关节功能恢复方面，试验组的 Lysholm 评分、膝关节活动度和后抽屉试验结果均优于对照组，进一步支持了机器人辅助手术在促进患者术后功能恢复、维持膝关节稳定性方面的优势，PCL 重建效果更为理想。在影像学指标中，尽管两组术后胫骨后移程度没有显著差异，然而胫骨隧道内口的变化差异为机器人辅助手术的优越性提供了有力的证据，隧道内口的改善（尤其是隧道缩小）通常与术后膝关节稳定性和功能恢复密切相关。因此，尽管两组胫骨后移程度在短期内无显著不同，但胫骨隧道内口的变化可能反映了机器人辅助手术在促进关节长期稳定性和减少并发症方面的潜力。值得注意的是，尽管机器人辅助手术在多个方面表现出显著优势，但手术时间并未缩短。虽然机器人系统能够精确规划手术路径和隧道定位，但初期的设备准备和图像配准可能会增加一定的手术时间。此外，试验组术后 VAS 评分与对照组无明显差异，这可能是疼痛管理的标准化、术后疼痛感受的个体差异等多种因素共同作用的结果。因此，考虑到机器人辅助手术的

众多优势，其临床应用前景仍然非常广泛。然而，本研究也存在一些局限性。首先，样本量相对较小，研究时间较短，未能进行长期的随访观察，无法评估机器人辅助技术在长期效果和功能恢复方面的表现。此外，机器人辅助手术的成本较高，设备和技术要求较为复杂，可能限制其在临床上的广泛应用，需进一步权衡其临床效益与经济成本的关系。

利益冲突声明： 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明： 鞠超杰、于洪文负责研究构思与设计；梁秀玉、郝松楠、张伟、项金香负责数据收集与分析；鞠超杰、于洪文、刘志佳负责论文撰写与修订；张伟、项金香、韩延龙负责数据解释与论文撰写；所有作者均阅读并同意最终稿，并对研究的完整性和准确性负责。

参考文献

- [1] Chahla J, Williams B T, LaPrade R F. Posterior cruciate ligament[J]. Arthroscopy, 2020, 36(2): 333-335.
- [2] 刘昭, 白晓东, 杨军, 等. 镜下全内技术交叉韧带重建与常规技术比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2024, 32(12): 1089-1094.
- [3] 申晟, 赵涵正, 朱俊博, 等. 镜下交叉韧带重建两种胫骨隧道建立技术比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2023, 31(6): 510-514.
- [4] Migliorini F, Pintore A, Vecchio G, et al. Ligament Advanced Reinforcement System (LARS) synthetic graft for PCL reconstruction: systematic review and meta-analysis[J]. Br Med Bull, 2022, 143(1): 57-68.
- [5] Verhulst F V, MacDonald P. Diagnosing PCL injuries: history, physical examination, imaging studies, arthroscopic evaluation[J]. Sports Med Arthrosc Rev, 2020, 28(1): 2-7.
- [6] 孙鑫, 戚大春. 后侧双与单入口镜下交叉韧带重建的比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2022, 30(24): 2235-2240.
- [7] Schroven W, Vles G, Verhaegen J, et al. Operative management of isolated posterior cruciate ligament injuries improves stability and reduces the incidence of secondary osteoarthritis: a systematic review[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2022, 30(5): 1733-1743.
- [8] Song J G, Kim H J, Han J H, et al. Clinical outcome of posterior cruciate ligament reconstruction with and without remnant preservation[J]. Arthroscopy, 2015, 31(9): 1796-1806.
- [9] 张晓东, 葛艺苑, 朱耿耀, 等. 关节镜下自体腓骨长肌腱重建损伤的膝关节交叉韧带 20 例[J]. 山东医药, 2024, 64(6): 86-89.
- [10] 刘玉强, 李明, 刘宁. 两种镜下胫骨隧道定位交叉韧带重建比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2022, 30(24): 2229-2234.
- [11] 鲁军伟, 韩亮, 韩帅, 等. 机器人辅助全膝关节置换术治疗膝关节炎临床效果研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2024, 5(5): 783-788.
- [12] 梁求真, 郑江, 赵赞栋, 等. 骨科机器人定位与传统徒手定位法重建内侧膝股韧带的对比研究[J]. 中国骨与关节杂志, 2024, 13(11): 878-883.
- [13] Kennedy N I, LaPrade R F, Goldsmith M T, et al. Posterior cruciate ligament graft fixation angles, part 2: biomechanical evaluation for anatomic double-bundle reconstruction[J]. Am J Sports Med, 2014, 42(10): 2346-2355.
- [14] 卜延民, 赵慧雯, 郑得志, 等. 关节置换术机器人手术系统的现状及发展趋势[J]. 中国矫形外科杂志, 2024, 32(19): 1780-1785.
- [15] 张乾, 何云利, 贺强, 等. 机器人手术在关节外科的应用进展[J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(7): 57-59.
- [16] 王曦竹, 陈依民, 韩巍, 等. 骨科机器人辅助股骨颈动力交叉钉系统治疗股骨颈骨折[J]. 中国骨伤, 2024, 37(2): 114-119.
- [17] 谢旭华, 范顺云, 李靖龙, 等. 3D 导航联合混合现实在后交叉韧带重建隧道定位中的应用[J]. 云南医药, 2023, 44(3): 8-12.

(下转 216 页)