

机器人辅助微创技术与切开复位内固定治疗 Schatzker I~III 型胫骨平台骨折的疗效比较

卢姬玲^{1,2,3}, 刘峰^{1,2}, 王康^{1,2}, 黄大立^{1,2}, 邹有凡^{1,2,3}, 陈俐颖^{1,2,3}

(1. 长沙市第三医院骨科, 长沙 410015; 2. 湖南中医药大学附属长沙医院, 长沙 410015; 3. 湖南中医药大学, 长沙 410208)

[摘要] 目的: 精准的微创治疗已逐渐成为现代外科手术的核心理念, 智能机器人的快速发展也推动着骨折的精准微创治疗成为必然趋势。本研究旨在比较机器人辅助微创技术与传统切开复位内固定(open reduction and internal fixation, ORIF)治疗 Schatzker I~III型胫骨平台骨折的临床疗效。方法: 收集2022年6月至2024年8月在长沙市第三医院接受手术治疗的单纯 Schatzker I~III型胫骨平台骨折患者的临床资料。依据纳入与排除标准共纳入45例患者, 并根据治疗方案分为机器人组($n=18$)和ORIF组($n=27$)。比较2组患者手术切口长度、手术时间、术中出血量、住院时间、骨折复位质量、骨折愈合时间、住院总费用以及术后并发症等指标。采用Rasmussen放射学评分标准评价骨折复位质量, 采用美国特种外科医院(Hospital for Special Surgery, HSS)评分评价膝关节功能。结果: 机器人组手术时间为(133.56 ± 24.09) min, ORIF组为(132.19 ± 27.28) min, 差异无统计学意义($P=0.864$); 机器人组术中出血量为20.00 (8.75, 50.00) mL, ORIF组为100.00 (50.00, 100.00) mL, 差异有统计学意义($P=0.003$); 机器人组切口长度为(3.44 ± 0.51) cm, ORIF组为(10.89 ± 3.27) cm, 差异有统计学意义($P<0.001$); 机器人组住院时间为(6.44 ± 1.25) d, ORIF组为(11.48 ± 1.89) d, 差异有统计学意义($P<0.001$); 机器人组骨折愈合时间为(11.94 ± 1.26)周, ORIF组为(12.96 ± 0.90)周, 差异有统计学意义($P=0.006$); 机器人组完全负重时间为(13.17 ± 1.15)周, ORIF组为(14.33 ± 0.96)周, 差异有统计学意义($P=0.001$); 机器人组住院总费用为($17\ 760.45\pm2\ 975.69$)元, ORIF组为($21\ 631.17\pm1\ 911.76$)元, 差异有统计学意义($P<0.001$)。机器人组HSS评分为(90.17 ± 8.07), ORIF组为(84.22 ± 8.05), 差异有统计学意义($P=0.020$); 机器人组Rasmussen放射学评分为(16.33 ± 1.78), ORIF组为(15.15 ± 2.09), 差异无统计学意义($P=0.055$)。机器人组与ORIF组Rasmussen放射学评分总体优良率分别为94.44%(17/18)、92.59%(25/27), HSS评分总体优良率分别为94.44%(17/18)、88.89%(24/27), 差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。机器人组术后未发生感染、骨折不愈合、内固定松动等并发症。ORIF组1例术后发生浅表切口感染, 经口服抗生素及创口换药后伤口愈合; 1例发生腓静脉血栓形成, 经抗凝治疗后血栓溶解。机器人组并发症总发生率为0%, ORIF组并发症总发生率为7.41%(2/27), 差异无统计学意义($P>0.05$)。结论: 机器人辅助微创技术治疗 Schatzker I~III型胫骨平台骨折疗效满意, 具有创伤小、恢复快、并发症少等优点, 但未来需要更大样本的研究以进一步证实其优势。

[关键词] 胫骨平台骨折; 机器人辅助微创技术; Schatzker分型; 切开复位内固定; 临床疗效; HSS评分; Rasmussen放射学评分

Comparative efficacy of robot-assisted minimally invasive technique versus open reduction and internal fixation for Schatzker type I to III tibial plateau fractures

LU Jiling^{1,2,3}, LIU Feng^{1,2}, WANG Kang^{1,2}, HUANG Dali^{1,2}, ZOU Youfan^{1,2,3}, CHEN Liying^{1,2,3}

收稿日期(Date of reception): 2025-09-17

第一作者(First author): 卢姬玲, Email: 2483699131@qq.com, ORCID: 0009-0009-5149-354X

通信作者(Corresponding author): 刘峰, 主任医师, Email: 2306766134@qq.com, ORCID: 0009-0001-4968-013X

基金项目(Foundation item): 湖南省自然科学基金(2026JJ82437); 长沙市自然科学基金(kq2502293)。This work was supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (2026JJ82437) and the Natural Science Foundation of Changsha (kq2502293), China.

开放获取(Open access): 本文遵循知识共享许可协议, 允许第三方用户按照署名-非商业性使用-禁止演绎4.0(CC BY-NC-ND 4.0)的方式, 在任何媒介以任何形式复制、传播本作品(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)。

(1. Department of Orthopedics, Third Hospital of Changsha, Changsha 410015; 2. Changsha Hospital Affiliated to Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410015; 3. Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China)

ABSTRACT

Objective: Precise minimally invasive treatment has gradually become a core concept in modern surgery, and the rapid development of intelligent robotic systems has further promoted precision minimally invasive fracture management as an inevitable trend. This study aimed to compare the clinical efficacy of robot-assisted minimally invasive techniques with conventional open reduction and internal fixation (ORIF) in the treatment of Schatzker type I to III tibial plateau fractures.

Methods: Clinical data of patients with isolated Schatzker type I to III tibial plateau fractures who underwent surgical treatment at the Third Hospital of Changsha between June 2022 and August 2024 were retrospectively collected. According to the inclusion and exclusion criteria, 45 patients were enrolled and divided into a robot-assisted group ($n=18$) and an ORIF group ($n=27$) based on the treatment strategy. Surgical incision length, operative time, intraoperative blood loss, length of hospital stay, fracture reduction quality, fracture healing time, total hospitalization cost, and postoperative complications were compared between the 2 groups. Fracture reduction quality was evaluated using the Rasmussen radiological scoring system, and knee joint function was assessed using the Hospital for Special Surgery (HSS) knee scoring system.

Results: The operative time was (133.56 ± 24.09) min in the robot-assisted group and (132.19 ± 27.28) min in the ORIF group, with no statistically significant difference ($P=0.864$). Intraoperative blood loss was 20.00 (8.75, 50.00) mL in the robot-assisted group and 100.00 (50.00, 100.00) mL in the ORIF group, showing a statistically significant difference ($P=0.003$). The incision length was (3.44 ± 0.51) cm in the robot-assisted group and (10.89 ± 3.27) cm in the ORIF group ($P<0.001$). Length of hospital stay was (6.44 ± 1.25) d in the robot-assisted group and (11.48 ± 1.89) d in the ORIF group ($P<0.001$). Fracture healing time was (11.94 ± 1.26) weeks in the robot-assisted group and (12.96 ± 0.90) weeks in the ORIF group ($P=0.006$). Time to full weight-bearing was (13.17 ± 1.15) weeks in the robot-assisted group and (14.33 ± 0.96) weeks in the ORIF group ($P=0.001$). The total hospitalization cost was $(17\,760.45 \pm 2\,975.69)$ yuan in the robot-assisted group and $(21\,631.17 \pm 1\,911.76)$ yuan in the ORIF group ($P<0.001$). The HSS score was (90.17 ± 8.07) in the robot-assisted group and (84.22 ± 8.05) in the ORIF group, with a statistically significant difference ($P=0.020$). The Rasmussen radiological score was (16.33 ± 1.78) in the robot-assisted group and (15.15 ± 2.09) in the ORIF group, without statistical significance ($P=0.055$). The overall excellent-to-good rates of Rasmussen radiological scores were 94.44% (17/18) and 92.59% (25/27) in the robot-assisted and the ORIF groups, respectively. The overall excellent-to-good rates of HSS scores were 94.44% (17/18) and 88.89% (24/27), respectively. No statistically significant differences were observed between groups (all $P>0.05$). No postoperative complications such as infection, fracture nonunion, or internal fixation loosening occurred in the robot-assisted group. In the ORIF group, 1 patient developed superficial incision infection postoperatively, which healed after oral antibiotics and wound dressing changes; another patient developed peroneal vein thrombosis, which resolved after anticoagulant therapy. The overall complication rate was

0% in the robot-assisted group and 7.41% (2/27) in the ORIF group, with no statistically significant difference ($P>0.05$).

Conclusion: Robot-assisted minimally invasive techniques achieved satisfactory clinical outcomes in the treatment of Schatzker type I to III tibial plateau fractures, with advantages including reduced surgical trauma, faster recovery, and fewer complications. However, larger-scale studies are still required to further validate these advantages.

KEY WORDS tibial plateau fracture; robot-assisted minimally invasive technique; Schatzker classification; open reduction and internal fixation; clinical efficacy; HSS score; Rasmussen radiological score

胫骨平台骨折是严重的关节内骨折类型, 占全身骨折的1%~2%^[1-2]。Schatzker I~III型骨折主要累及胫骨外侧平台, 多因交通事故、高空坠落等高能量损伤所致, 占有胫骨平台骨折的55%~70%^[3-4]。Schatzker I~III型骨折治疗不当可能导致膝关节对位不良和稳定性下降, 严重影响患者的生活质量, 特别是关节面塌陷超过2 mm时, 需要通过手术治疗恢复关节面的平整性, 以避免远期并发症^[5-6]。切开复位内固定(open reduction and internal fixation, ORIF)是治疗 Schatzker I~III型骨折的“金标准”, 但其需要大面积剥离软组织并广泛暴露关节腔, 容易诱发伤口感染、关节僵硬等并发症。随着微创技术的不断发展, 关节镜辅助复位技术可在直视条件下评估关节面塌陷及复位固定情况, 但仍存在关节腔内视野受限、术中体位频繁调整、骨折块定位不精准、操作技术要求高等问题^[7-8]。同时, 徒手撬拨复位内固定技术的疗效高度依赖术者个人经验, 其局限性包括: 复位难度大、继发骨缺损风险高、置钉精准度欠佳, 以及因反复穿刺导致的骨皮质损伤和术中辐射暴露过多等问题^[9]。

近年来, 国产“天玑”骨科手术机器人系统(TiRobot)在国内逐步得到推广应用, 其凭借精准的导航定位系统、智能的路径规划系统以及稳定的操作系统等优势, 在脊柱、骨盆、股骨颈等骨折手术中展现出较高的应用价值^[10-12]。相较于传统内固定手术, 机器人辅助系统能够极大地提高微创手术的精准性, 减少手术创伤, 加速患者康复^[13-14]。目前, 骨科手术机器人技术的临床应用多集中于精准置钉, 在辅助骨折复位方面的应用较为有限。本研究回顾性分析2022年6月至2024年8月长沙市第三医院收治的单纯 Schatzker I~III型胫骨平台骨折患者的临床资料, 比较机器人辅助微创技术与传统 ORIF 的临床疗效, 为临床治疗提供依据。

1 对象与方法

1.1 伦理声明

本研究获得长沙市第三医院伦理审查委员会批准(批准号: KY-EC-2025-012), 所有患者对研究内容知情同意并签署知情同意书。

1.2 对象

收集2022年6月至2024年8月在长沙市第三医院接受手术治疗的胫骨平台骨折患者的临床资料。纳入标准: 1)单纯 Schatzker I~III型骨折患者; 2)伤后21 d内的闭合性骨折患者; 3)接受骨科机器人辅助微创治疗或传统 ORIF 治疗的患者; 4)随访时间 ≥ 6 个月且随访资料完整的患者。排除标准: 1)陈旧性骨折患者; 2)开放性骨折或合并血管、神经严重损伤患者; 3)严重骨质疏松性骨折或病理性骨折患者; 4)既往有患肢严重膝关节炎病史者。依据纳入与排除标准共纳入45例患者, 并根据治疗方案分为机器人组($n=18$)和 ORIF 组($n=27$)。

1.3 治疗方法

1.3.1 术前准备

所有患者入院后进行全身状况评估, 并完善患肢X线正侧位片、CT平扫及三维重建、MRI等相关影像学检查, 明确骨折类型、劈裂以及关节面塌陷程度(图1)。术前根据患者状况给予冰敷、消肿、止痛等处理, 并应用低分子肝素钠预防下肢深静脉血栓形成。对于骨折移位明显的患者, 术前采用石膏进行临时固定。机器人组使用国产“天玑”骨科手术机器人系统(TiRobot), 该系统由主控工作站、手术规划与控制软件、机械臂、光学跟踪系统以及匹配工具组成, 术前完成设备校准与无菌准备。

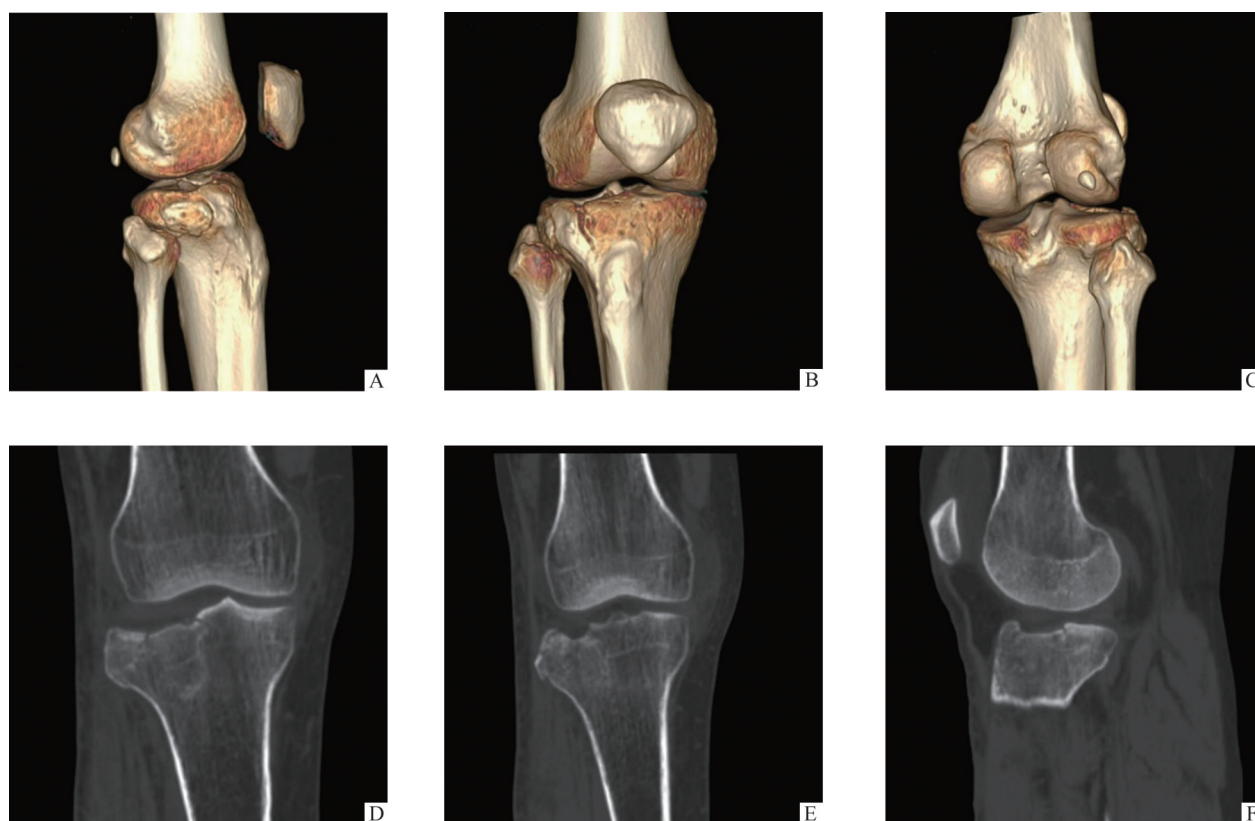


图1 术前三维CT重建图像

Figure 1 Preoperative three-dimensional CT reconstruction images

A–C: Lateral (A), anteroposterior (B), and posteroanterior (C) images of CT for the affected limb; D–F: Coronal (D and E) and sagittal (F) images of CT for the affected limb.

1.3.2 手术方法

所有手术由同一组具有丰富经验、熟悉机器人辅助微创手术和ORIF治疗的高年资医师完成,术前根据骨折类型和手术计划准备不同规格的全螺纹空心螺钉和锁定钢板螺钉。

机器人组:患者全身麻醉后取仰卧位,手术区常规消毒、铺巾,安装下肢托架及定位装置。调试机器人系统和C型臂机,确保光学追踪系统与机械臂能正常运行。采集患肢标准正位与侧位影像,并将图像数据上传至主控平台进行术前路径规划,同时在系统界面设置复位器械通道、螺钉置入的位置及角度(图2)。对于存在劈裂的骨折患者,先经皮钳夹复位,临时固定劈裂骨折块,再在主控台上规划3枚自外向内平行于关节面的导针,然后由手术机器人将克氏针置入设计位置。对于骨折线延伸范围较大者,则在劈裂骨块远端额外增加1枚拉力螺钉进行增强固定。对于关节面塌陷明显的骨折患者(多见于Schatzker II/III型),需设计1枚自外侧平台前下方指向骨折塌陷中央下方的导针用于引导复位器械置入。在机械臂引导下经通道开窗,将复位器械精准置入预设位置进行撬顶复位,复位后将3枚预设导针置入

复位后关节面下方进行临时固定。术中开展三维C臂检查明确关节面复位质量。若塌陷区域存在骨缺损,则于术中经撬拨复位通道填充长条形人工骨。最后,通过导针通道自外向内置入3枚全螺纹空心螺钉至内侧平台正常骨质处支撑固定骨折,3枚螺钉均匀分布,并覆盖塌陷区域,螺钉贯穿内外侧平台且均位于软骨下骨,为复位后的关节面提供坚强支撑(图3)。透视见骨折复位良好,内固定位置良好。术毕,彻底清洗术区,止血并缝合切口。

ORIF组:患者全身麻醉或椎管内麻醉后取仰卧位,患肢绑止血带,常规消毒、铺巾。经胫骨前外侧入路切开皮肤、皮下组织、髂胫束等,显露外侧胫骨平台,切开发关节囊以显露关节面。劈裂骨块通过复位钳夹持骨块纠正移位;存在塌陷的骨折,则在外侧平台前下方开窗,置入撬棒自塌陷骨折块下方推顶,将关节面复位至正常水平。透视确认关节面平整后,使用克氏针临时固定,根据骨缺损情况向塌陷区植入自体髂骨或人工骨。置入锁定加压钢板或空心螺钉完成固定。术中透视确认骨折复位及内固定位置良好,使用生理盐水彻底冲洗关节腔。术毕,冲洗伤口并逐层缝合切口。

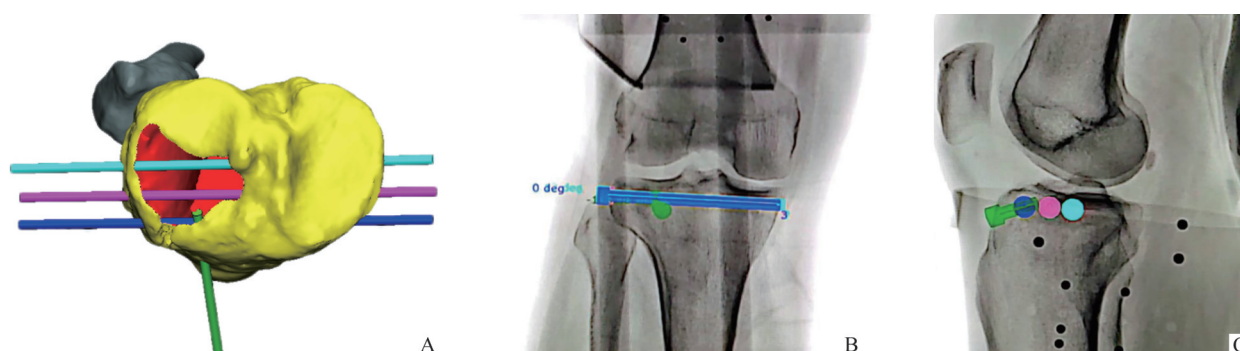


图2 机器人导航系统手术规划界面

Figure 2 Surgical planning interface of the robotic navigation system

A: Reduction instruments and the position and angle of screw placement are designed based on preoperative CT images of fractures. B: Paths of transverse parallel guide pin during surgery are planned. C: Paths of reduction guide pin in anterior and posterior positions during surgery are planned. Dark blue, lilac, and light blue represent the 3 pre-placed guide pins oriented parallel to the articular surface in the anterior, middle, and posterior positions, respectively.

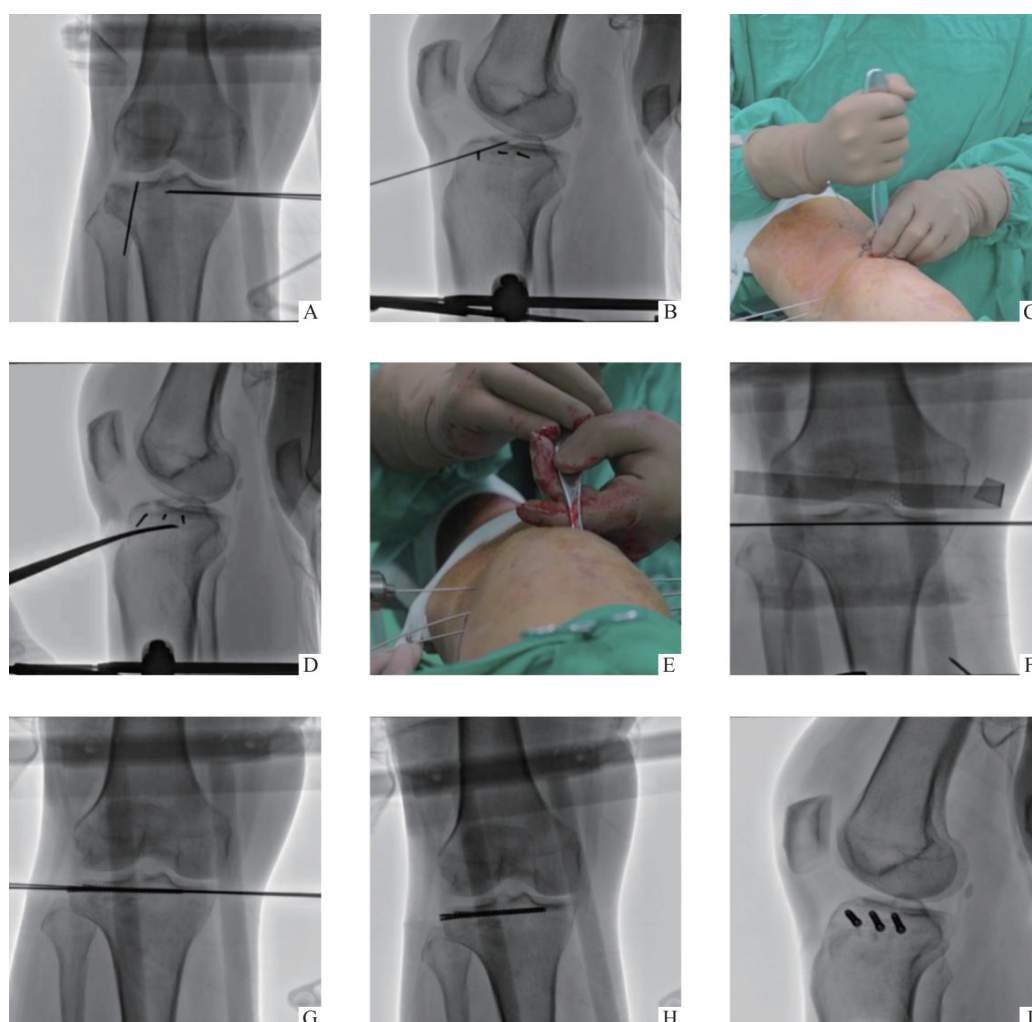


图3 机器人辅助内固定治疗 Schatzker II型骨折的关键术中步骤

Figure 3 Key intraoperative steps of robot-assisted internal fixation for Schatzker type II fracture

A and B: Robotic system precisely places the guide pins. C: Guide pin is used to channel the reduction instrument from the initial position to the preset position. D: Lever reduction is performed using the reduction instrument. E and F: While maintaining the levered reduction, guide pins are inserted to temporarily fix the fracture. G: Cannulated screws are inserted through the guide pin channels to complete the fixation. H and I: Intraoperative fluoroscopy is performed to confirm the fracture reduction and the efficacy of internal fixation.

1.3.3 术后处理及功能康复

术后常规给予消肿、消炎、镇痛、抗凝和预防感染等治疗。术后第1天进行股四头肌等长收缩、踝关节以及足趾屈伸运动,术后第2天在医生指导下逐步加强训练。根据患者恢复情况,术后4~6周可进行部分负重活动,骨折完全愈合后再进行完全负重活动。

1.4 疗效评价

比较2组患者手术切口长度、手术时间、术中出血量、住院时间、骨折复位质量、骨折愈合时间、住院总费用以及术后并发症等指标。术后第1天复查患肢膝关节正侧位X线片及三维CT,评估骨折复位质量和内固定位置情况。采用美国特种外科医院(Hospital for Special Surgery, HSS)膝关节评分系统评价术后膝关节功能:满分100分,包括疼痛(30分)、功能(22分)、活动度(18分)、屈曲畸形(10分)、稳定性(10分)和肌力(10分);此外,还包括3个减分项目,即使用手杖或拐杖、伸直滞缺、膝关节内外翻畸形。评分结果分级:85~100分为优,70~84分为良,60~69分为可,≤59分为差。采用Rasmussen放射学评分系统评价骨折复位质量,包括关节面塌陷、平台增宽、膝内外翻等维度,总分18,其中18分为优,12~17分为良,6~11分为可,≤5分为差。

术后第1、2、3、6、12个月定期随访复查,评估骨折愈合、膝关节功能恢复以及相关并发症等情况。末次随访时,评估并记录膝关节活动度和Rasmussen放射学评分。骨折愈合标准以X线片显示骨折线模糊且有连续性骨痂通过骨折线为依据。

1.5 统计学处理

采用SPSS 27.0统计学软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用独立样本 t 检验;不符合正态分布的计量资料以中位数(第1四分位数,第3四分位数)表示,组间比较采用曼-惠特尼 U 检验;计数资料采用频数(率)表示,组间比较采用 χ^2 检验或Fisher精确概率法。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 2组基线资料比较

机器人组包括Schatzker I型3例,II型8例,III型7例,均接受机器人辅助内固定治疗;ORIF组包括Schatzker I型6例,II型16例,III型5例,均接受传统ORIF治疗。2组患者性别、年龄、受伤原因、受伤侧别、Schatzker分型以及受伤至手术时间等基线资料(表1)比较,差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。

表1 ORIF组与机器人组患者基线资料比较

Table 1 Comparison of baseline data between patients in the ORIF group and the robotic group

组别	n	年龄/岁	性别/[例(%)]		受伤原因/[例(%)]		
			男	女	交通伤	坠落伤	其他
机器人组	18	53.17±11.65	9(50.00)	9(50.00)	9(50.00)	1(5.56)	8(44.44)
ORIF组	27	49.44±16.72	19(70.37)	8(29.63)	11(40.74)	4(14.82)	12(44.44)
χ^2/t		0.880	1.907			1.042	
P		0.384	0.167			0.594	
组别	受伤至手术时间/d	受伤侧别/[例(%)]		Schatzker分型/[例(%)]			
		左膝	右膝	I型	II型	III型	
机器人组	2.56±0.78	12(66.67)	6(33.33)	3(16.67)	8(44.44)	7(38.89)	
ORIF组	3.04±0.81	14(51.85)	13(48.15)	6(22.22)	16(59.26)	5(18.52)	
χ^2/t		1.982	0.972			2.292	
P		0.054	0.324			0.318	

年龄、受伤至手术时间等计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用独立样本 t 检验;性别、受伤原因、受伤侧别、Schatzker分型等计数资料以频数(率)表示,组间比较采用 χ^2 检验。ORIF: 切开复位内固定。

2.2 2组术中、术后各指标比较

术后三维CT图像(图4)显示关节面复位良好,螺钉置入位置合理,骨折块对位对线良好。45例患者

均获得随访,随访时间6~12(平均8)个月。机器人组手术时间65~171 min,术中出血量5~100 mL,切口长度3~4 cm,住院时间4~9 d,骨折愈合时间10~14

周, 完全负重时间 12~15 周, 住院总费用 12 890.96~21 673.44 元; ORIF 组手术时间 60~190 min, 术中出血量 50~300 mL, 切口长度 4~16 cm, 住院时间 8~15 d, 骨折愈合时间 11~14 周, 完全负重时间 12~16 周, 住院总费用 18 002.89~25 512.92 元。2 组指标

组间比较结果(表 2)显示, 机器人组术中出血量、切口长度、住院时间、骨折愈合时间、完全负重时间以及住院总费用均少于或短于 ORIF 组, 差异均有统计学意义(均 $P<0.01$)。

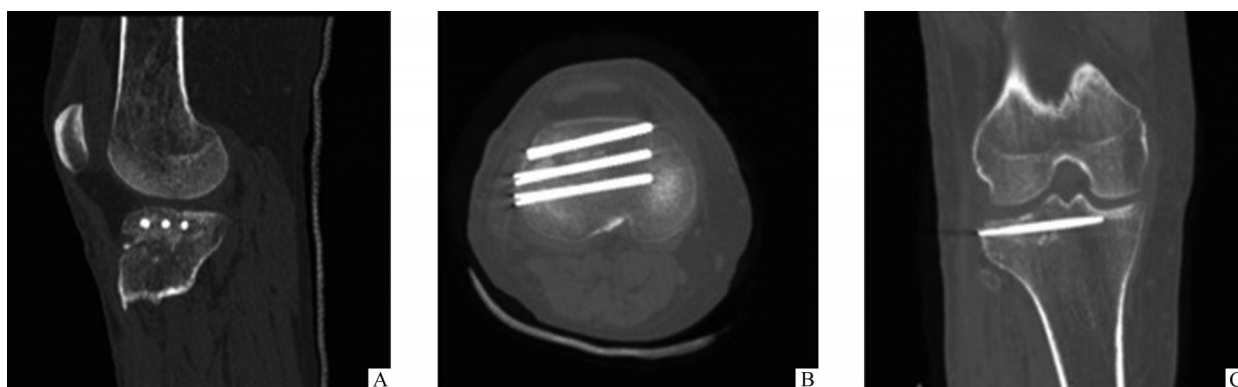


图4 术后三维CT图像

Figure 4 Postoperative three-dimensional CT images

Postoperative three-dimensional CT images demonstrate satisfactory reduction of the articular surface (A), appropriate placement of screws (B), and good alignment and apposition of the fracture fragments (C).

表2 ORIF组与机器人组手术指标比较

Table 2 Comparison of surgical indicators between the ORIF group and the robotic group

指标	机器人组($n=18$)	ORIF组($n=27$)	Z/t	P
手术时间/min	133.56 $\pm$ 24.09	132.19 $\pm$ 27.28	0.173	0.864
术中出血量/mL	20.00 (8.75, 50.00)	100.00 (50.00, 100.00)	3.016	0.003
切口长度/cm	3.44 $\pm$ 0.51	10.89 $\pm$ 3.27	11.605	<0.001
住院时间/d	6.44 $\pm$ 1.25	11.48 $\pm$ 1.89	9.943	<0.001
骨折愈合时间/周	11.94 $\pm$ 1.26	12.96 $\pm$ 0.90	2.966	0.006
完全负重时间/周	13.17 $\pm$ 1.15	14.33 $\pm$ 0.96	3.555	0.001
住院总费用/元	17 760.45 $\pm$ 2 975.69	21 631.17 $\pm$ 1 911.76	4.887	<0.001

术中出血量的比较采用曼-惠特尼 U 检验, 数据用中位数(第1四分位数, 第3四分位数)描述, 统计量为 Z 值; 其他计量资料的比较采用 t 检验, 数据用均数 $\pm$ 标准差描述, 统计量为 t 值。

在骨折复位质量及膝关节功能恢复方面, 机器人组 Rasmussen 放射学评分 11~18, HSS 功能评分 69~100; ORIF 组 Rasmussen 放射学评分 10~18, HSS 功能评分 68~98。Rasmussen 放射学评分和 HSS 功能评分结果(表 3)显示, 机器人组膝关节功能(HSS 功能评分)恢复效果优于 ORIF 组, 差异有统计学意义($P<0.05$)。组间比较结果(表 4)显示: 机器人组与 ORIF 组 Rasmussen 放射学评分总体优良率分别为 94.44%(17/18)、

92.59%(25/27), HSS 评分总体优良率分别为 94.44%(17/18)、88.89%(24/27), 差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。

所有患者术后无伤口深部感染, 无内固定丢失、断裂等严重并发症。机器人组术后未发生感染、骨折不愈合、内固定松动等并发症。ORIF 组 1 例术后发生浅表切口感染, 经口服抗生素及创口换药后伤口愈合; 1 例发生腓静脉血栓形成, 经抗凝治疗后血

栓溶解。机器人组并发症总发生率为0%, ORIF组并发症总发生率为7.41%(2/27), 差异无统计学意义($P>$

0.05)。机器人组患者因切口较小, 术后可早期开展功能锻炼, 恢复良好(图5)。

表3 ORIF组与机器人组 Rasmussen 放射学评分和 HSS 评分比较

Table 3 Comparison of Rasmussen radiological score and HSS score between the ORIF group and the robotic group

组别	<i>n</i>	Rasmussen 放射学评分	HSS 评分
机器人组	18	16.33±1.78	90.17±8.07
ORIF 组	27	15.15±2.09	84.22±8.05
<i>t</i>		1.974	2.425
<i>P</i>		0.055	0.020

数据用均数±标准差描述, 采用 *t* 检验。HSS: 美国特种外科医院。

表4 ORIF组与机器人组 Rasmussen 放射学评分和 HSS 评分优良率分布比较

Table 4 Comparison in the distribution of excellent and good rates of Rasmussen radiological score and HSS score between the ORIF group and the robotic group

组别	<i>n</i>	Rasmussen 放射学评分					HSS 评分				
		优	良	可	差	优良率/%	优	良	可	差	优良率/%
机器人组	18	14	3	1	0	94.44	14	3	1	0	94.44
ORIF 组	27	19	6	2	0	92.59	15	9	3	0	88.89
<i>P</i>						>0.999					0.640

2组比较采用 Fisher 精确概率法。



图5 机器人组患者术后切口及早期功能锻炼

Figure 5 Postoperative incision and early functional exercise in patients in the robotic group

A: Length of the minimally invasive incision ranges from 1 to 2 cm. B: Status of knee joint mobility training in early postoperative period.

3 讨论

传统 ORIF 是治疗 Schatzker I~III 型骨折的“金标准”, 但存在创伤大、术后恢复慢、术后并发症多等问题^[15]。传统微创技术如关节镜辅助内固定、经皮复

位内固定、C 型臂透视辅助等虽可在一定程度上实现微创化, 但仍存在精准复位难度高、置钉不够精准、需要反复透视等问题。本研究采用“天玑”骨科手术机器人联合三维 C 型臂辅助微创治疗 Schatzker I~III 型胫骨平台骨折, 通过规划螺钉路径及骨折复位通

道,实现“复位-置钉”一体化操作,极大地提高治疗效果。本研究结果显示,机器人组切口长度、术中出血量、住院时间、骨折愈合时间及完全负重时间等多项指标均优于ORIF组,验证了机器人辅助手术的安全性和有效性。机器人组手术时间略长与机器人系统的设备摆放、影像采集和导入及路径规划等环节有关,但随着术者操作熟练度的提高和手术流程的优化,手术时间将会缩短。机器人组Rasmussen放射学评分稍高于ORIF组,机器人组HSS评分明显高于ORIF组。上述结果表明,机器人辅助技术不仅能达到传统手术的骨折复位质量,而且在术后膝关节功能恢复方面更具优势,但长期疗效需更大样本量进一步验证。

在Schatzker I~III型胫骨平台骨折的治疗中,螺钉固定与钢板固定是2种常见的固定方式,其生物力学特性能直接影响骨折稳定性与术后康复。传统ORIF多采用锁定钢板固定,但其近端螺钉受钢板位置及螺孔设计的限制,螺钉与塌陷骨块的软骨下骨之间仍存在一定的距离,无法对塌陷骨块实现软骨下骨的有效支撑。螺钉则可以根据塌陷骨折的位置灵活调整,精准置入软骨下骨区域,对塌陷骨折块实现直接稳定固定。Boisrenoult等^[16]基于新鲜尸体模型比较钢板螺钉与双螺钉固定Schatzker II型骨折的效果,发现二者在生物力学稳定性方面无显著差异。Koval等^[17]在劈裂型外侧平台骨折模型的生物力学研究中指出,支撑板并不比单独使用螺钉固定更具优势,二者在稳定性、循环加载下的位移和失效强度方面表现相似。因此,对于Schatzker I~III型胫骨平台骨折患者,螺钉固定几乎能够实现对骨折块的坚强固定,并具有创伤小、固定方式灵活等优势,是一种可行的内固定选择。

目前,螺钉固定方式主要包括平行固定、三角固定以及栅栏固定3种形式^[18]。本研究采用机器人辅助空心螺钉固定,根据不同的骨折类型选择相应的螺钉固定方式。针对关节面塌陷型骨折,将塌陷骨块撬顶复位后,在软骨下骨处置入2~3枚空心螺钉对塌陷骨块进行支撑固定;针对外侧劈裂骨块且外侧壁完整的骨折,使用复位钳将骨折块复位后,在平行固定的基础上,在劈裂骨块远端额外增加1枚拉力螺钉进行增强固定,形成三角固定;针对外侧劈裂但外侧壁不完整的骨折,则应采用栅栏固定方式,在软骨下骨处置入2~3枚空心螺钉,再自前向后紧挨着平行螺钉置入1~2枚螺钉,构成“栅栏样”结构,不仅能对上方的平行螺钉起到支撑作用,而且能防止骨折块下沉。需要指出的是,对于严重骨质疏松患者,单纯螺钉固定方式存在复位丢失、骨不连或

固定失败等风险^[19]。本研究结果显示,根据术后影像学评估及临床随访结果,螺钉固定方式在维持关节面复位以及降低二次塌陷风险方面均表现良好。

“天玑”骨科手术机器人系统凭借其高精度的智能导航和机械控制技术,为骨折复位与内固定手术提供了系统化、标准化的微创解决方案。其核心由红外定位的双目摄像系统、六轴机械臂和规划控制模块组成,能够在二维或三维图像上进行手术路径设计,确定最佳进针点和螺钉轨迹,并能一次性规划多条路径,极大简化手术流程,大幅提升手术效率和精度。在手术过程中,机械臂可按照预设路径自动移动,示踪器实时监测并反馈其运动状态,一旦机械臂精准移动至目标位置,手术医生便可借助机械臂末端的导向套管准确置入导针和空心螺钉。若患者在手术过程中发生位置变化,“天玑”机器人系统可以实时监测并自我修正,确保手术路径与规划路径保持一致;在导航系统的辅助下,可以以亚毫米级精度精确置入导针和螺钉,确保螺钉保持在骨性通道内,从而有效降低医源性血管和神经损伤的风险。同时,系统配备了关节力控制技术,遇到障碍物时会自动停止,能够有效防止意外损伤。根据系统的操作流程,成像只需在术前、导针插入后和螺钉置入后3个阶段进行,能显著减少X射线暴露。

现有的骨科手术机器人系统普遍侧重于精准置钉,在骨折复位技术方面的研究相对有限。不同于既往聚焦于机器人辅助置钉的研究,本研究针对Schatzker II/III型骨折常见的关节面塌陷特点,创新性地应用机器人的精确定位和路径规划能力,设计了一条由外侧平台前方指向塌陷骨块中央下方的专用复位通道。在导航引导下,该路径可确保复位器械通过微创切口精准抵达关节面塌陷区域的正下方理想支撑点,从而实现机器人辅助下的微创和精准撬拨复位;同时,还设计了3枚平行于关节面、均匀分布于骨折区域的导针路径,不仅确保了空心螺钉在复位后关节面下方的最佳力学支撑位置,还通过精准的路径规划规避了螺钉穿出关节面损伤软骨的风险。整个复位、固定操作通过微创切口便可完成,且操作全程位于安全骨道内,显著降低了对关节软骨和软组织的医源性损伤风险。

“天玑”机器人系统优势如下:1)精度高。研究^[20-21]显示“天玑”机器人系统的定位误差<1 mm,能够实现亚毫米级定位精度,避免人为误差。2)安全性好。机械臂和导航技术能够实现对手术操作的精准控制,能够避开重要的血管、神经,且复位操作全程位于骨性结构内,能够避免误入关节。3)创伤

小。机器人手术不需要大范围剥离组织,可减少术中出血量,缩短住院时间,促进康复,降低术后感染率。4)可重复性好。标准化的手术流程可减少医师技术差异对手术结果的影响。5)减少辐射暴露。机器人的精准置钉有效减少术中因钉道调整而使用的X线次数,减少了医患的辐射暴露^[11,22]。然而,“天玑”机器人系统辅助手术也存在不足:1)尽管机器人系统可提供精准的复位路径规划与导航,但复位过程尚未实现完全自动化,最终复位仍需术者结合传统复位器械完成,复位功能还需进一步完善。2)目前国内骨科机器人手术技术仍在发展中,其在骨盆、脊柱等骨折固定方面有较为成熟的操作系统,但在四肢骨折的应用方面仍处于探索阶段。3)机器人设备的购置及维护成本较高,不适合在基层医院推广。4)机器人系统的稳定性对定位准确度有着较大影响。

本研究仍存在一定的局限性:1)作为回顾性研究,部分临床数据可能存在缺失,需要进一步采取前瞻性研究来验证。2)本研究采取单中心研究设计,样本量较小,且仅纳入Schatzker I~III型简单骨折病例,研究结论对复杂骨折类型的普遍适用性存在局限,后续需要多中心研究进一步验证。3)机器人辅助胫骨平台骨折手术总时间相较于传统ORIF暂无明显优势,后续可对该技术学习曲线进行量化分析,提高术者操作熟练度,优化手术流程。

综上所述,机器人辅助微创治疗Schatzker I~III型胫骨平台骨折疗效满意,具有创伤小、恢复快、并发症少等优点,但未来需要更大样本以进一步证实其优势;同时需要探索降低成本和提高效率的合作模式,促进精准医疗技术的普及。

作者贡献声明: 卢姬玲 研究设计,数据分析,论文撰写与修改;刘峰 研究设计,手术操作,论文指导与修改;王康、黄大立 手术操作,论文指导;邹有凡、陈俐颖 数据采集,统计分析。所有作者阅读并同意最终的文本。

利益冲突声明: 作者声称无任何利益冲突。

参考文献

- [1] Schatzker J, Kfuri M. Revisiting the management of tibial plateau fractures[J]. *Injury*, 2022, 53(6): 2207-2218. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.04.006>.
- [2] Fändriks A, Tranberg R, Karlsson J, et al. Gait biomechanics in patients with intra-articular tibial plateau fractures-gait analysis at three months compared with age- and gender-matched healthy subjects[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 702. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04577-y>.
- [3] Jeong JJ, Oh SB, Ji JH, et al. Immediate arthroscopy following ORIF for tibial plateau fractures provide early diagnosis and treatment of the combined intra-articular pathologies[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(10): 3327-3333. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05345-1>.
- [4] 胡春宁, 任一, 唐广应, 等. 关节镜下辅助治疗胫骨平台骨折合并交叉韧带损伤的临床效果分析[J]. *航空航天医学杂志*, 2020, 31(4): 439-440. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1434.2020.04.027>.
- [5] HU Chunling, REN Yi, TANG Guangying, et al. Clinical effect analysis of arthroscopic adjuvant treatment of tibial plateau fracture complicated with cruciate ligament injury[J]. *Journal of Aerospace Medicine*, 2020, 31(4): 439-440. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1434.2020.04.027>.
- [6] Vendevre T, Gayet LÉ. Percutaneous treatment of tibial plateau fractures[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2021, 107(1S): 102753. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.102753>.
- [7] Goff T, Kanakaris NK, Giannoudis PV. Use of bone graft substitutes in the management of tibial plateau fractures[J]. *Injury*, 2013, 44(Suppl 1): S86-S94. [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(13\)70019-6](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(13)70019-6).
- [8] Hermanowicz K, Malinowski K, Góralczyk A, et al. All-arthroscopic treatment of schatzker type III lateral tibial plateau fracture without fluoroscopy[J/OL]. *Arthrosc Tech*, 2019, 8(6): e574[2025-08-23]. <https://doi.org/10.1016/j.eats.2019.01.021>.
- [9] Le Baron M, Cermolacce M, Flecher X, et al. Tibial plateau fracture management: ARIF versus ORIF-clinical and radiological comparison[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2019, 105(1): 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.10.015>.
- [10] 胡力轩, 殷钦, 蒋涛, 等. 膝关节后内侧入路联合胫后骨隧道撬拨复位技术治疗胫骨平台后外侧柱骨折[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2025, 18(4): 324-330. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-9958.2025.04.06>.
- [11] HU Lixuan, YIN Qin, JIANG Tao, et al. Posteromedial approaches combined with posterior tibial bone tunnel lever reduction technique for the treatment of posterolateral tibial plateau fractures[J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Surgery*, 2025, 18(4): 324-330. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-9958.2025.04.06>.
- [12] Zheng G, Nolte LP. Computer-assisted orthopedic surgery: current state and future perspective[J]. *Front Surg*, 2015, 2: 66. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2015.00066>.
- [13] Liu HS, Duan SJ, Xin FZ, et al. Robot-assisted minimally-invasive internal fixation of pelvic ring injuries: a single-center experience[J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(1): 42-51. <https://doi.org/10.1111/os.12423>.
- [14] Wu XB, Wang JQ, Sun X, et al. Guidance for the treatment of femoral neck fracture with precise minimally invasive internal fixation based on the orthopaedic surgery robot positioning system[J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(3): 335-340. <https://doi.org/10.1111/os.12451>.
- [15] Li S, Du J, Huang Y, et al. Comparison of the efficacies of TINAVI robot-assisted surgery and conventional open surgery

- for Levine-Edward type IIA (postreduction) hangman fractures [J]. *Sci Rep*, 2023, 13: 15934. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43136-4>.
- [14] Wang X, Zhang Y, Lou L, et al. Robotic-assisted systems for the safe and reliable treatment of femoral neck fractures: retrospective cohort study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 633. <https://doi.org/10.1186/s13018-023-04070-3>.
- [15] Zhou W, Li M, Ma R, et al. Diagnosis and treatment of schatzker type II tibial plateau fracture with an isolated bone fragment: a case report and literature review[J]. *Orthop Surg*, 2022, 14(5): 1011-1015. <https://doi.org/10.1111/os.13209>.
- [16] Boisrenoult P, Bricteux S, Beaufils P, et al. Screws versus screw-plate fixation of type 2 Schatzker fractures of the lateral tibial plateau. Cadaver biomechanical study. *Arthroscopy French Society*[J]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 2000, 86(7): 707-711.
- [17] Koval KJ, Polatsch D, Kummer FJ, et al. Split fractures of the lateral tibial plateau: evaluation of three fixation methods [J]. *J Orthop Trauma*, 1996, 10(5): 304-308. <https://doi.org/10.1097/00005131-199607000-00003>.
- [18] 刘家伦, 张英泽, 郑占乐. 胫骨平台骨折内固定生物力学研究进展[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2024, 38(1): 113-118. <https://doi.org/10.7507/1002-1892.202309077>.
LIU Jialun, ZHANG Yingze, ZHENG Zhanle. Research progress on biomechanics for internal fixation in tibial plateau fracture[J]. *Chinese Journal of Reporative and Reconstructive Surgery*, 2024, 38(1): 113-118. <https://doi.org/10.7507/1002-1892.202309077>.
- [19] 王丽. 经皮螺钉固定 Schatzker I型胫骨平台骨折的初步有限元分析[J]. *中国骨伤*, 2022, 35(7): 644-649. <https://doi.org/10.12200/j.issn.1003-0034.2022.07.010>.
WANG Li. Preliminary finite element analysis of percutaneous screw fixation of Schatzker type I tibial plateau fracture[J]. *China Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 2022, 35(7): 644-649. <https://doi.org/10.12200/j.issn.1003-0034.2022.07.010>.
- [20] Huang Y, Jiao J, Wang J, et al. Utilization of cannulated screw fixation of Jail and TiRobot-assisted percutaneous indirect reduction technique for AO/OTA type 41B2 tibial plateau fracture treatment[J]. *Knee*, 2024, 47: 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2023.12.013>.
- [21] Lu Y, Xu Y, Ren C, et al. A feasibility study of robot-assisted percutaneous reduction and fixation technique for treating posterolateral depression tibial plateau fractures[J]. *Sci Rep*, 2023, 13: 22026. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49624-x>.
- [22] Le X, Tian W, Shi Z, et al. Robot-assisted versus fluoroscopy-assisted cortical bone trajectory screw instrumentation in lumbar spinal surgery: a matched-cohort comparison[J/OL]. *World Neurosurg*, 2018, 120: e751[2025-08-23]. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.08.157>.

(责任编辑 陈丽文)