

机器人辅助经椎间孔腰椎椎体间融合术专家共识

机器人辅助经椎间孔腰椎椎体间融合术手术技术专家组

摘要:机器人辅助经椎间孔腰椎椎体间融合术(robot-assisted transforaminal lumbar interbody fusion, RA-TLIF)是一项新兴的手术技术,与传统透视引导下徒手 TLIF 相比,其准确率高,在椎弓根纤细、解剖变异和翻修手术中具有巨大的优势。目前关于 RA-TLIF 的关键手术技术、并发症和远期随访方面尚存在一定争议,部分医生对手术的适应证和禁忌证等问题尚不明确。为规范 RA-TLIF 的临床应用,稳步推进该技术的开展,经全国脊柱专家多次讨论,在循证医学的基础上,使用改良 Delphi 调查法制定本共识,为广大学者提供参考。

关键词:机器人辅助;经椎间孔腰椎椎体间融合术;临床应用;手术技术;专家共识

中图分类号:R681.5

文献标志码:A

Expert consensus on robot-assisted transforaminal lumbar interbody fusion surgical techniques

Robot-assisted Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Surgical Technical Expert Group

Abstract: Robot-assisted TLIF (RA-TLIF) is an emerging surgical technique with higher accuracy than traditional fluoroscopy-traditional guided TLIF, which highlights great advantages especially in pedicle slenderness, anatomical variations and revision surgery. There is still some controversy about the key surgical techniques, complications and long-term follow-up of RA-TLIF, and some surgeons' grasp of the indications and contraindications of the procedure is still unclear. In order to standardise the clinical application of RA-TLIF and to steadily promote the development of this technology, this consensus has been formulated on the basis of evidence-based medicine using the modified Delphi survey method after many discussions among spine experts across the country to provide a reference for the majority of colleagues.

Key words: Robot-assisted; Transforaminal lumbar interbody fusion; Clinical application; Surgical techniques; Expert consensus

腰椎融合术是腰椎间盘突出症、腰椎管狭窄症、腰椎滑脱症及腰椎侧凸等腰椎疾病的主要手术方式,在1911年由Hibbs与Albee分别提出^[1-3]。此后,腰椎融合术逐渐发展,植骨融合术及腰椎内固定器械的应用提高了腰椎手术的融合率及稳定性,显著改善了腰椎手术的手术疗效。Harms等^[1]于1982年首次报道了经椎间孔腰椎椎体间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)。随着TLIF技术的发展及微创理念的流行,Foley等^[2]于2002年首次提出微创经椎间孔入路腰椎椎体间融

合术(minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion, MIS-TLIF),其具有创伤小、术中出血少、椎旁肌肉损伤小及降低神经根牵拉并发症等优点。

近年来,机器人辅助骨科手术在临床应用中逐渐得到广泛认知,相较于常规手术,其具有“微创、精准、低辐射、学习曲线平缓”等诸多优点。2004年,Wolf等^[3]报道了第1例脊柱机器人导航系统,证实其安全、准确,并可提高手术效率。此后十余年间,各类机器人系统相继涌现,如TiRobot、ORTH-

BOT、Spine Assist/Renaissance、SPINEBOT、Excelsius GPS、Mazor X、ROSA 以及 Da Vinci Robot 等,但其主要结构部件类似,包括机械臂系统、光学跟踪系统、手术规划系统及导航系统^[4]。手术机器人首先通过导航系统收集患者信息,完成定位以及对局部解剖组织结构化、立体化重建成像,然后操作者在重建的图像上规划手术路径,机械臂根据光学示踪器定位至指定位置,手术者按规划路径植入螺钉。可视化置钉能实时、清晰地显示置钉过程中椎弓根螺钉与椎弓根、椎体的关系,当三维图像显示置钉角度有穿破椎弓根皮质的可能性时,可以及时调整进针角度,从而有效提高置钉准确性,避免徒手植入的误差,进而减少并发症的发生^[5]。

近年来机器人辅助 TLIF(robot-assisted TLIF, RA-TLIF)技术发展迅速,在减小手术伤口、减少术后并发症、提高手术精准度及稳定性等方面展现出独有的优势,但在适应证的选择、围手术期评估与处理、手术技术与操作规范、并发症预防与治疗、术后随访等诸多方面仍存在争议,因此,本共识邀请国内相关领域的专家,在现有循证医学证据的基础上,采用改良 Delphi 法^[6]共同讨论制定本共识,旨在帮助脊柱外科医生正确认识和规范应用机器人辅助 TLIF,提高手术疗效,减少并发症。

1 制定方法

1.1 文献检索

共识由工作组通过“robot-assisted TLIF”“TLIF”“MIS-TLIF”“lumbar interbody fusion”“Endo-TLIF”“机器人辅助下经椎间孔腰椎椎体间融合术”“内镜下经椎间孔腰椎椎体间融合术”和“骨科手术机器人”等检索词在 Medline、Embase、Cochrane Library、中国知网、万方等数据库进行检索与回顾,检索发表于 2024 年 6 月之前关于 RA-TLIF 的全部文献。

1.2 专家评估

采用改良的 Delphi 调查研究法拟定草案。调查专家由国内具有丰富经验的 30 位脊柱外科专家共同完成。调查修订过程经过问卷草案修订、三轮问卷调查及面对面会议讨论,据改良 Delphi 原则 $\geq 70\%$ 以上专家同意便达成共识, $< 30\%$ 则不纳入共识, $\geq 30\% \sim 70\%$ 进入下一轮专家问卷调查,最终起草了本共识,供广大同道参考。

2 RA-TLIF 的适应证与禁忌证

2006 年,Holly 等^[7]指出伴有机械性腰痛和神经根性疼痛的腰椎滑脱症是 TLIF 的最佳适应证;此外,腰椎间盘突出症复发、椎板切除术后腰椎失稳、创伤及椎间盘源性腰痛等亦可行 TLIF 技术;但对于椎间孔内存在联合神经根患者,TLIF 技术损伤神经根的风险较大,是该技术的禁忌证之一。Karikari 等^[8]于 2010 年报道了 MIS-TLIF 的技术和结果回顾,指出 MIS-TLIF 适用于 Meyerding 分级 I 级或 II 级腰椎滑脱、多发性复发性腰椎间盘突出症、严重的退行性腰椎疾病、椎板切除术后不稳定、假关节翻修和需要椎间融合术的创伤等;不适用于严重骨质疏松致螺钉把持力差的患者。Lau 等^[9]指出对于肥胖患者,MIS-TLIF 技术相较于常规开放手术中出血量少、住院时长短、术后并发症低。

随着机器人手术技术逐步进入临床,很多学者将机器人辅助置钉应用于经椎间孔腰椎间融合术,Tian 等^[10]认为对于微创手术、暴露有限或翻修手术,与传统方法相比,机器人辅助系统在置钉准确性和安全性方面有较大优势;Chang 等^[11-12]回顾了机器人辅助系统在骨科手术中的应用,认为在退行性滑脱、腰椎节段不稳等疾病应用 RA-TLIF 是一种安全有效的术,可显著提高椎弓根螺钉置钉的准确性,减少手术创伤并促进术后快速恢复。RA-TLIF 的适应证包括:①腰椎滑脱;②腰椎间盘突出患合并节段不稳定;③腰椎神经减压后导致节段不稳定;④腰椎管狭窄症合并腰椎退变性侧凸或后凸;⑤复发性腰椎间盘突出症或椎管狭窄,需在原手术节段再次减压手术^[7-9,13-17]。此外,针对椎弓根纤细、脊椎变异或畸形、多节段融合等病例 RA-TLIF 尤为适用,机器人系统可利用术前 CT 与术中影像配准,降低神经血管损伤风险。RA-TLIF 的禁忌证包括:①基础疾病较多,身体条件不能耐受手术者;②腰椎肿瘤、感染的患者;③椎体前方骨桥形成而无法撑开椎间隙者。此外椎间孔内存在联合神经根或严重肥胖患者(BMI > 40)可作为相对禁忌证^[8,16-18]。

3 术前评估

3.1 患者一般身体状况评估

拟行 RA-TLIF 的患者多有脊髓、神经受压引发

的肢体疼痛、麻木、无力以及肌肉萎缩和感觉障碍等表现,绝大多数患者病程长、生活质量低,甚至并存心理问题。手术目的是解除脊髓、神经压迫、重建脊柱稳定性,为患者脊髓、神经功能恢复创造条件。要对患者进行详细的病史及体征收集,体格检查的重点是神经功能检查,评估神经根受压的范围和程度。体格检查时患者只着短裤,暴露全身,充分了解头部与骨盆的关系以判断冠状面和矢状面平衡情况,根据前后屈曲和侧方屈曲情况评估脊柱柔韧性。其他体格检查包括肩部和骨盆平衡,双下肢长度,膝关节和髋关节活动度,以及完整的神经系统检查和营养情况评估。

3.2 影像学评估

术前首先对患者手术节段进行精确诊断,确保患者临床表现和影像学结果相符。影像学检查应包括脊柱全长正侧位、过伸过屈位及左右侧 Bending 相 X 线,测量脊柱矢状位、冠状位参数和矢状位骨盆参数,评估椎体在动力位的稳定性、退行性侧弯柔韧性和邻近节段的代偿能力,再通过 CT 三维重建和 MRI 检查进一步评价骨性结构形态、软组织及神经组织情况。同时应结合实验室、肌电图检查等排除感染、肿瘤或运动神经元等其他神经系统病变^[19-20]。

3.3 患者骨密度评估

高龄患者骨质疏松发病率较高,国内研究显示,70 岁以上女性的骨质疏松发病率为 26.48%,男性为 16.83%,骨质疏松可能增加脊柱内固定失败风险。因此术前需要进行检查以综合评估、制定患者的手术方案,推荐使用双能 X 线吸收法 (dual X-ray absorptiometry, DXA) 测定骨密度,骨密度绝对值 $<80 \text{ mg/cm}^3$ 为骨质疏松,也可利用血清 25 羟维生素 D 浓度测定作为替代方法。若患者存在骨质疏松则需先抗骨质疏松治疗,并在手术中采取提高螺钉稳定性的技术,如骨水泥强化或使用椎弓根膨胀螺钉等技术^[19]。

3.4 患者主观感受和功能情况评估

骨科医师除了进行客观评价,还需要对患者的主观感受和功能情况进行评估。推荐使用视觉模拟评分 (visual analogue scale, VAS)、Oswestry 功能障碍指数 (oswestry disability index, ODI) 评估、生活质量 SF-36 量表评估患者腰背痛情况及生活质量;对于合并退行性侧凸患者,推荐使用脊柱侧凸研究学会 22 项 (Scoliosis research society-22, SRS-22) 问卷进行相关评估^[21-23]。

3.5 手术风险评估

患者需进行手术风险评估,①心肺功能评估:对于心肺储备功能较差的老年患者,手术可能导致心肺功能进一步下降,因此术前应常规行心脏彩色多普勒超声、胸部 X 线片、肺功能、动脉血气分析等检查评估心肺功能。②脑卒中相关评估:高龄患者脊柱相关疾病还应术前对患者围手术期脑卒中的风险进行充分评估,必要时请神经内科会诊。③内分泌相关评估:糖尿病患者可适当增加围手术期活动量,同时配合糖尿病饮食、降糖药物及严密的血糖监测,必要时请内分泌科会诊。④静脉血栓风险评估:通过病史采集、体格检查、特殊检查及术前实验室凝血功能检查,可发现患者是否存在可能增加围手术期出血及血栓发生风险的相关疾病。建议围手术期适度补液,避免血液浓缩;规范手术操作,减少手术操作造成的静脉内膜损伤。术后早期抬高患肢和功能锻炼。药物预防则需充分权衡患者的血栓和出血风险利弊,合理选择抗凝药物。⑤麻醉前评估:术前访视与评估对于安全实施麻醉手术至关重要,其目的是客观评价患者对麻醉手术的耐受力及其风险,同时对患者的术前准备提出建议,以求尽可能提高患者对麻醉、手术的耐受力,降低围手术期并发症和死亡风险^[20]。

4 RA-TLIF 手术操作过程

4.1 麻醉及患者准备

麻醉方式为全身麻醉,在 3D-CT 或 O 臂扫描和机械臂置钉过程中应保持低潮气量 (约为 6 mL/kg)^[24-26],以降低呼吸对稳定性的影响。

4.2 机器人系统的安装及螺钉置入

4.2.1 机器人系统与示踪器安装

全身麻醉后,患者体位与常规手术的要求相同,注意清除任何妨碍透视或者机器人运行的障碍物。对患者的相关区域进行消毒,铺上无菌布,留出手术区域。安装机器人的无菌罩及配件,将标定系统放于患者手术区域,注意机器人应置于便于在手术节段区域操作的位置。

示踪器安装的可靠性与术中的稳定性直接决定了下一步配准的准确性和后续所有操作的精度。一般固定在骨性标志上 (如髂嵴或棘突),安装后可使用宽幅、高黏性的无菌透明手术贴膜固定,以增加示踪器的稳定性;在整个手术过程中,所有团队成员应明确参考架的位置,在安装微创通道、调整手术床或

传递器械时,动作应轻柔,避免触碰或牵拉连接线。若怀疑或确认参考架发生移位,应重新进行影像扫描和系统配准。

4.2.2 机器人系统配准

不同机器人系统有不同配准方式,常见的有术前进行CT扫描与术中“O”臂或“C”臂X线扫描数据进行配准和术中“O”臂或3D-C臂扫描

CT数据进行配准等(图1)。术中行3D-CT扫描后,将影像导入医生工作站,或者术中透视与术前3D-CT拟合后,完成解剖结构定位并立体化重建成像,利用双目摄像头对标定系统进行跟踪,使机器人知道患者的位置信息。跟踪步骤完成后撤掉标定系统,为后续手术操作留出空间。

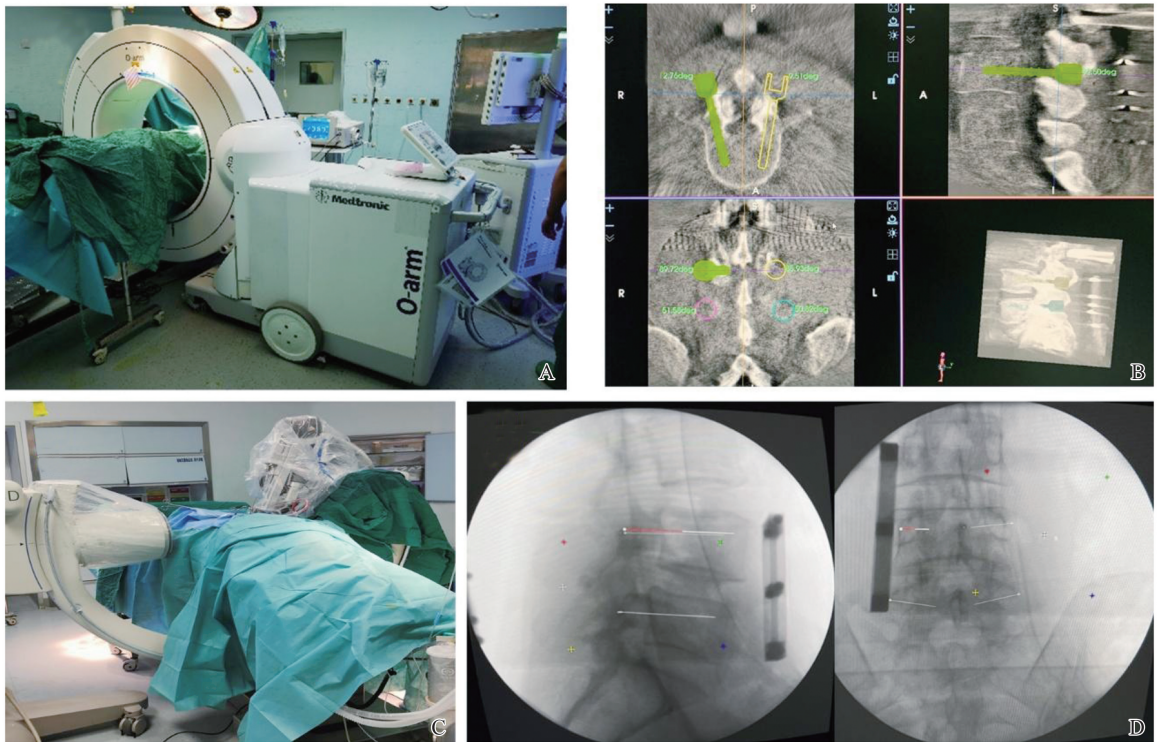


图1 RA TLIF 常见两种配准方式

A、B: 术中“O”臂扫描CT数据配准并规划螺钉参数; C、D: 术前CT数据与术中X线配准并规划螺钉参数。

Figure 1 Common alignment methods for RA TLIF

A、B: “O” arm scanning got intraoperative CT to alignment and planning the screw type and path; C、D: Preoperative CT and intraoperative X-ray to alignment and planning the screw type and path.

4.2.3 机器人螺钉规划

操作者在重建的图像上规划手术路径,选择脊柱节段,螺钉直径,螺钉长度和轨迹等,在规划手术路径时应选择椎弓根较平缓处作为进钉点,以降低在螺钉置入过程中“漂移”现象。对于经皮置钉,同侧螺钉皮肤置入点应选择内外适中的位置,为下一步减压切口做准备。

4.2.4 机器人螺钉置入

在不同机器人系统中可以选择不同的螺钉置入方式,如直接置钉、经导针置钉等(图2)。以机器人经导针置钉为例,机械臂根据光学示踪器定位至指定位置,在其引导下由术者或者机器人置入导针,透视确认导针位置满意后(导针置入深度以前端不超过椎体长度的2/3为宜),沿导针依次

置入非减压侧螺钉,装棒后适度提拉复位后锁紧系统。对于II度滑脱或骨质疏松者,也可在减压及融合完毕后植入螺钉,装棒后双侧同时提拉,复位后锁紧系统。

对初学者建议应用导针置钉避免严重神经及血管并发症,天玑等机器人有可视化螺钉系统,使螺钉在置入过程中可视化,可根据术中螺钉位置图像进行调整,有效减少神经及血管的严重损伤;螺钉置入过程中出现的“漂移”现象^[27]是由于对螺钉施加的力过小引起或机器人和患者之间的相对运动,建议术中采用电动工具,可保证施加在螺钉力的大小,同时可采用机器人随动平台系统,以减轻呼吸等造成机器人和患者之间的相对运动造成的影响。



图2 RA TLIF 置钉方式
A: 机器人辅助置钉; B: 机器人自动置钉。

Figure 2 RA TLIF pedicle screw placement

A: Robot assisted pedicle screw placement; B: Robot automatic pedicle screw placement.

4.3 减压

在处理椎间隙的过程中,可以充分利用棘突间、椎板间黄韧带对走行根和硬膜囊的覆盖保护作用,对于无黄韧带肥厚的滑脱患者仅切除椎间孔部位的黄韧带,完成椎体间融合即可,从而保留棘突间、椎板间黄韧带;对于伴黄韧带肥厚的滑脱患者需要在完成椎间融合后进一步切除椎板间黄韧带,彻底减压神经根及硬膜囊;对于中央型椎管狭窄、存在双下

肢症状的患者,可行单侧入路双侧减压(unilateral laminectomy for bilateral decompression, ULBD),行椎间融合后,向对侧倾斜通道,用磨钻经棘突根部潜行减压至对侧侧隐窝,用刮匙、椎板咬骨钳、髓核钳等逐步去除增生肥厚的黄韧带,完成双侧神经根及硬膜囊减压^[28-29](图3)。手术过程中由于工作通道较小、软组织阻挡等因素,手术视野会受到影响,使用显微镜或放大镜加头灯可使视野清晰。

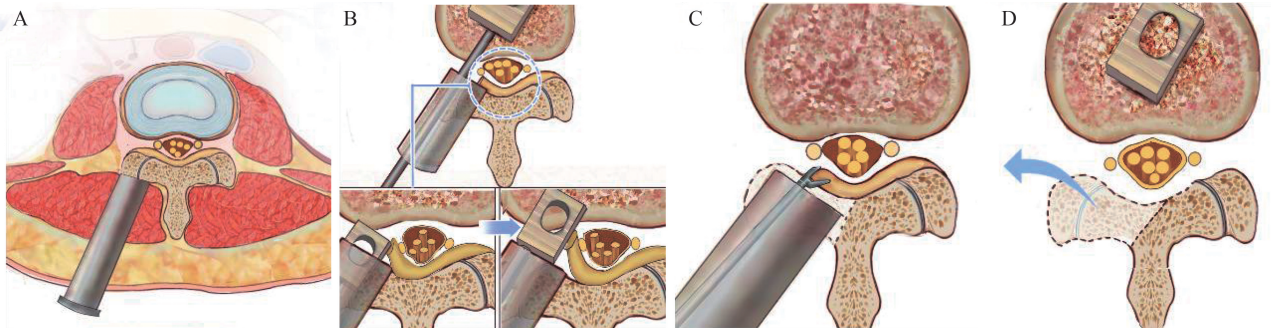


图3 黄韧带保留的椎管减压过程

A: 安装微创通道; B: 暂时保留椎板间部分黄韧带进行椎间融合术; C: 切除板间肥厚黄韧带完全减压; D: 必要时 ULBD, 去除对侧黄韧带及其骨性附着缘。

Figure 3 The process of decompression of the spinal canal with preservation of the ligamentum flavum

A: Docking of a minimally invasive channel; B: Temporary preservation of a portion of the ligamentum flavum in the interlaminar area for interbody fusion; C: Resection of the hypertrophied ligamentum flavum and complete decompression; D: ULBD, if necessary, with removal of the contralateral ligamentum flavum and its osseous attaching edge.

4.4 椎间融合

RA-TLIF 的椎间融合一般有 TLIF、MIS-TLIF、Endo-TLIF 等方式。TLIF 与 MIS-TLIF 椎间融合方式相似,不同之处 TLIF 在正中做约 3 cm 切口,剥离肌肉显露关节突关节,不需要微创通道;MIS-TLIF 在术侧 2 枚导针间做长约 2.5 cm 切口,依次切开,自多裂肌外侧肌间隙分离显露关节突关节,安装微创通道(可选择可扩张或管状通道,直径一般为 26~30 mm),切除通道内软组织,显露关节突关节。切除上位椎体下关节突、下位椎体部分上关节突,打开椎间孔,显露椎间盘。小刀切开纤维环,用铰刀行

椎间盘切除,刮匙刮除软骨终板,最大程度地暴露骨性终板,将自体骨粒植于椎间隙前方,再将自体骨粒填于椎间融合器内打入椎间隙,透视确认融合器位置满意。对于 Endo-TLIF 来说椎间融合相对复杂,置入经皮螺钉导丝,沿手术侧其中 1 枚导丝适当延长切口约 1 cm,安装工作通道后清晰显露关节突关节,椎间隙处理完毕后,根据减压碎骨量决定是否需要同种异体骨或人工骨。将减压骨块修整成合适大小置入椎间隙,并敲实。内镜下探查,植骨块有无脱落,神经结构被保护良好,确定舌形工作套管位置满意及稳定后,置入合适大小椎间融合器。

4.5 安装连接棒及滑脱复位

沿导针依次置入螺钉,选择长度合适的连接棒,装棒后锁紧系统。Ⅱ度以上滑脱或骨质疏松的患者,也可先行减压、融合之后,利用双侧螺钉的力量行提拉复位,避免拔钉影响复位效果,对于重度滑脱或复位较困难者也可不行复位。在沿导针置入椎弓根螺钉的过程中,需要反复透视确认螺钉以及导针的位置,一是可以及时的修正螺钉的位置,二是避免导针与螺钉方向不一致时,导针被推向前方,冲破椎体前缘发生血管、脏器等损伤。

5 RA-TLIF 的并发症的预防和处理

RA-TLIF 与常规 TLIF 和 MIS-TLIF 类似,常见的并发症包括术后伤口感染、硬膜囊损伤及脑脊液漏、神经根损伤、硬膜外血肿、椎管减压不充分、椎间融合器移位、螺钉误置及邻近节段退变等^[27,30-35]。

5.1 螺钉“漂移”及关节突关节侵扰

RA-TLIF 手术存在的“漂移”现象以及螺钉置入过程中关节突关节侵扰是该类手术的常见并发症^[29,36-37],在规划手术路径时应选择椎弓根较平缓处作为进钉点,以降低在螺钉置入过程中“漂移”现象,同时应用可视化螺钉置入机器人系统,也是降低“漂移”现象的有效措施。机器人置入导针过程中,进行透视确认导针位置满意后(导针置入深度以前端不超过椎体长度的 2/3 为宜)再进行螺钉置入,以及在术前规划中选择合适的螺钉和进钉点也是减少关节突关节侵扰的重要措施,Wang 等^[17]报道 RA-TLIF 可降低近端小关节突关节的侵扰,降低远期邻近节段退变的发生率。机器人系统自动规划螺钉路径,并提供螺钉置入过程的可视化图像,实时动态监测螺钉位置便于术中进行调整,可降低近端小关节突关节的侵扰,降低远期邻近节段退变的发生率。

5.2 融合器沉降和移位

融合器沉降和移位是 RA-TLIF 手术的另一常见并发症^[33,38]。可能进一步导致融合失败、椎间高度丢失以及卡压神经出口根等不良后果。Garcia 等^[39]报道机器人辅助椎弓根螺钉置入可放置更大直径和长度的螺钉,同时确保融合器置入的方向与责任椎间隙的方向保持一致,减少融合器损伤终板甚至误入椎体的发生风险,从而降低融合器沉降的发生率。

5.3 血管神经损伤

严格把握微创融合适应证,术中充分显露、仔细操作,可有效降低血管、硬膜囊和神经根的损伤。Wang 等^[29]报道 MIS-TLIF 术中操作时,在保留黄韧带的前提下行椎管减压、椎间隙植骨和融合器的

置入,可显著降低硬膜囊及神经根的损伤。外侧黄韧带部分与小关节突关节的纤维囊结构合并形成关节囊的一部分,内侧黄韧带一直延伸到中线椎板,形成棘突处覆盖硬膜囊,黄韧带可作为硬膜囊的天然屏障,在减压以及椎间融合器置入过程中起到保护作用,在术中可保护硬膜囊和神经根,降低硬膜囊损伤、脑脊液漏及神经根损伤等。在置入螺钉过程中神经血管损伤也是机器人辅助 TLIF 术中常见的并发症,由于导针或椎弓根螺钉置入过深或处理椎间隙时突破前方韧带等造成^[9,27,34-35,40],螺钉置入过程中多次透视确认螺钉位置,是降低椎体前方血管损伤关键因素;在螺钉进入椎体 1/3 位置时拔出导针可避免因螺钉与导针之间摩擦力较大将导针带到椎体前方甚至突破椎体,以保护前方血管神经。

5.4 感染

术后伤口感染是常见并发症,术前应仔细评估并修正患者的风险因素,精心处理切口以及严格遵守无菌操作。机器人系统涉及设备较多,机器人的无菌罩安装以及操作过程中需要特别注意无菌操作,避免术区污染^[32]。

因此,预防 RA-TLIF 手术并发症的关键是选择经验丰富的医生和手术团队,并全面评估患者的风险因素,术中充分显露、仔细操作。如果出现任何并发症,及时进行治疗和修复,以避免对患者带来更大的危害。

6 术后疗效评估

6.1 临床效果评估

疼痛 VAS 评分、ODI 评分和 JOA 评分、SSS 评分、SF-36 评分等被广泛应用于疗效评价,Alsalmi 等^[22-23,41]研究表明,应用机器人辅助 TLIF 患者术后腰背痛 VAS 评分从术前的 6.69 ± 2.50 显著改善到最终随访时的 3.01 ± 2.68 ,腿部疼痛的 VAS 评分从 7.06 ± 2.28 改善到 2.43 ± 2.83 ,ODI 评分从 43.4 ± 18.3 改善到 16.2 ± 16.7 。机器人辅助 TLIF 技术 2 年临床疗效得到患者和医生的满意^[17,36,42]。

6.2 影像学评估

椎弓根螺钉置入准确性是机器人辅助 TLIF 术后随访的关键点之一,现通常采用 Gertzbein-Robbins 分级系统^[28,31-32],对螺钉置入准确性进行评价(图 4)。螺钉置入时突破椎弓根可能会导致患者硬膜和(或)神经根损伤,Han 等^[30]研究发现,169 例患者椎弓根螺钉置入的准确率为 93.4%,较徒手组高约 4.5%;Roser 等^[31]发表的一项随机对照研究表明,在机器人辅助下,99%的螺钉放置满意,而徒手

组为 98%，以上表明机器人辅助置钉的准确性较徒手组有明显提高。远期邻近节段退变也是患者随访关注点之一，应用 Babu 等^[43]观点评估术后关节突关节侵扰情况；通过术前和术后 2 年的侧位 X 线图像测量椎间盘高度来评估近端相邻节段的椎间盘退变，椎间融合率和内固定移位也是在随访中应当被关注的重点，应用 BSF 分类方法评估椎

间融合情况。Fogel 等^[44]分析了 172 例患者术后椎间融合情况，椎间融合率为 97%，无内固定移位；因此影像学检查评估是必需的，术后即刻（图 5）和 3 个月行 X 线及 3D-CT，可判断椎弓根螺钉置入的准确性及判断椎间植骨是否融合。CT 显示椎间融合及椎弓根置入临床满意后，每半年或一年定期门诊随访。

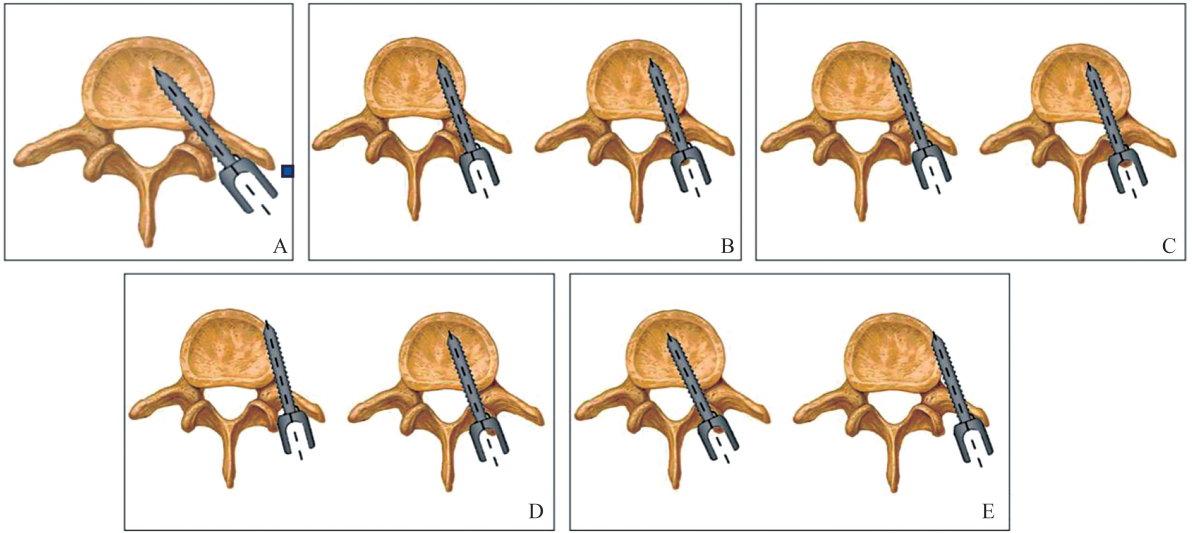


图 4 椎弓根螺钉准确性评价方法示意图

A: 0 级, CT 扫描显示椎弓根完全位于椎弓根及椎体内视为置入准确; B: 1 级, 可疑穿透椎弓根皮质(螺钉破坏椎弓根皮质, CT 扫描中椎弓根内侧或外侧皮质不可见); C: 2 级, 螺钉轻度穿透皮质 ≤ 2 mm; D: 3 级, 螺钉穿透皮质 2.1 ~ 4 mm 或 < 1 个螺钉直径; E: 4 级, 螺钉穿透皮质 > 4 mm 或 > 1 个螺钉直径。

Figure 4 Accuracy evaluation method for pedicle screws

A: Grade 0, CT scan showing that the pedicle is completely located in the pedicle and within the vertebral body is considered accurate placement; B: Grade 1, suspected penetration of the pedicle cortex (screw destruction of the pedicle cortex, medial or lateral cortex not visible on CT scan); C: Grade 2, the screw slightly penetrates the cortex ≤ 2 mm; D: Grade 3, the screw penetrates the cortex by 2.1 to 4 mm or less than 1 screw diameter; E: Grade 4, screw penetration cortex > 4 mm or > 1 screw diameter.



图 5 患者术前术后影像学变化

A, B: 患者术前脊柱全长正、侧位片; C, D: 患者术后腰椎正、侧位片; E, F: 患者术后螺钉置入 CT 影像。

Figure 5 Preoperative and postoperative imaging changes in the patients

A, B: Preoperative full-length ortho- and lateral films of the patient's spine; C, D: Postoperative ortho- and lateral films of the patient's lumbar spine; E, F: Postoperative CT images of the patient.

7 RA-TLIF 射线暴露、手术效率及学习曲线

7.1 术中辐射暴露少

在脊柱外科手术中,由于术中放射仪器的使用,几乎所有人体组织均可观察到辐射暴露的组织效应,术中高剂量放射可引起皮肤红斑、白内障、甲状腺肿瘤和其他恶性肿瘤等一系列并发症的产生,在术中成像过程中,医护人员和患者都会遭受到直接辐射和散射辐射^[45]。在脊柱手术中,脊柱透视成像比身体其他部位透视时患者受到相对更高的辐射剂量,Riis等^[46-48]认为多次透视及脊柱部位需接受较高的辐射增加了脊柱外科医生穿透性辐射的风险。在标准C型臂透视机辅助下,De Biase等^[47,49]将采用经皮椎弓根螺钉固定术与传统手术方式患者的术中辐射进行比较,经皮椎弓根螺钉固定术产生辐射的有效剂量比传统手术方式高3倍左右。Lee等^[45]认为徒手放置椎弓根螺钉术中透视次数多,无法有效减少患者与医生受到的辐射。传统徒手置钉需多次透视以调整螺钉置入位置、角度,而机器人辅助置钉仅需术中一次透视,与术前3D-CT拟合后,完成解剖结构定位并立体化重建成像,操作者在重建的图像上规划手术路径,无需透视,这从理论而言,机器人辅助置钉的患者辐射时间及辐射暴露量更低;对于医护人员而言,机器人系统都与3D-CT或O臂等术中扫描设备连接,在进行脊柱扫描时医护人员全部位于手术间外,医护人员的总体辐射暴露时间和剂量下降。机器人辅助下椎弓根螺钉植入手术具有对医护人员的辐射暴露少、置钉的准确性和效率高、软组织损伤小、操作可重复性高且不易疲劳等优势^[45-47]。

7.2 手术效率

使用与机器系统配套的机器采集全脊柱图像时,将3D-CT等扫描设备置于患者最佳位置,启动设备获得脊柱三维图像,由于术中脊柱影像采集和导入时间较短,并且术中CT导航可以减少因位置不佳调整螺钉的次数,从而节约手术时间,置钉效率较高^[50-56]。Hyun等^[32]对30例患者进行随机对照实验,结果显示徒手组放置一枚螺钉所需平均放射时间为13.3s,而机器人辅助置钉组为3.5s。而传统徒手置钉需多次透视以调整螺钉置入位置、角度,机器人辅助置钉仅需对脊柱进行一次透视,与术前3D-CT拟合后,无需再进行三维扫描,这个过程耗费的时间远小于徒手置钉,但由于机器人术前准

备及置钉前准备时间较长,所以总时间较徒手置钉较长。

7.3 学习曲线

机器人系统学习曲线平缓,机器人辅助置钉对青年医师更友好,借助术中实时影像,可有效提高螺钉准确性。有研究表明,机器人系统相对容易学习而达到熟练,置钉效率随着工作流程的熟悉和螺钉放置数目增加而提升^[32,39,41,49]。明确团队每人的职责、保证手术操作的可重复性,是手术成功的关键,同时充分利用术前CT,做好术前计划,避免术中反复调整。为提高手术效率,在主刀医师开始手术前,尽量完成机器人的相关设置及验证工作;手术操作时,团队成员应轮转起来,在主刀医师操作的同时,执行其他相关手术步骤,从而节省手术时间。有研究显示,初学者应用机器人系统时,置钉准确度在30例手术后可达到相对稳定的平台期,机器人引导成功放置螺钉成功率由82%上升至91%~93%,置钉时间也会降低^[57],随着例数的增加熟练度仍会不断积累,平均手术时间不断缩短,故随着手术病例数增加,学习曲线也会发生相应的变化。

8 展望

骨科手术机器人在减小手术伤口、降低术后并发症、提高手术精准度及稳定性等方面展现出独有的优势。但是目前缺乏RA-TLIF的长期随访研究,在远期并发症(如邻近节段退变、内固定失败、融合器沉降等)的发生率、患者生活质量的持久改善以及成本效益比等方面,仍需更多高级别、大样本的长期随访研究予以证实。我们呼吁并鼓励国内各中心持续开展RA-TLIF的长期、规范的术后随访工作,建立多中心协作数据库。通过系统性地收集远期临床结局与影像学数据,有望在未来构建更具说服力的长期疗效证据链,从而不断优化手术策略,最终使患者获得持久、稳定的手术收益。

随着机器人技术在脊柱手术中的深入应用,应当时刻明确其“增强智能”的定位。机器人系统在路径规划与执行精度方面具有显著优势,但在复杂手术中,术者的临床直觉、应变能力与整体决策仍是手术成功的核心。未来的RA-TLIF发展,应在人机协同的基础上,进一步融合多模态导航、实时反馈与人工智能预测,构建“医生—机器—患者”三方协同的智能手术生态。目前RA-TLIF手术主要集中于螺钉置入方面,相信随着研究进展,对于其他手术步骤如术中减压、椎间融合等都会有机器人系统的辅

助;同时随着大数据及人工智能的发展,患者术前术后的数据评估、术中效果预测等都会有机器人的参与。

生的损失赔偿责任,也不赋予处理医患法律纠纷的法律地位。

参考文献:

- [1] Harms J, Rolinger H. A one-stager procedure in operative treatment of spondylolistheses: dorsal traction-reposition and anterior fusion (author's transl) [J]. Z Orthop Ihre Grenzgeb, 1982, 120(3): 343-347.
- [2] Foley KT, Lefkowitz MA. Advances in minimally invasive spine surgery [J]. Clin Neurosurg, 2002, 49: 499-517.
- [3] Wolf A, Shoham M, Michael S, et al. Feasibility study of a mini, bone-attached, robotic system for spinal operations: analysis and experiments [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(2): 220-228.
- [4] Walker CT, Kakarla UK, Chang SW, et al. History and advances in spinal neurosurgery [J]. J Neurosurg Spine, 2019, 31(6): 775-785.
- [5] 曾成, 吴佳源, 丁红涛, 等. 新型可视化骨科机器人辅助与徒手开放腰椎椎弓根螺钉内固定术的回顾性队列研究 [J]. 首都医科大学学报, 2024, 45(5): 808-814. ZENG Cheng, WU Jiayuan, Ding Hongtao, et al. A retrospective cohort study on comparison between a novel visualized orthopedic robot-assisted technique versus a free-hand technique of pedicle screw placement in the lumbar spine [J]. Journal of Capital Medical University, 2024, 45(5): 808-814.
- [6] De Kleuver M, Lewis SJ, Gernscheid NM, et al. Optimal surgical care for adolescent idiopathic scoliosis: an international consensus [J]. Eur Spine J, 2014, 23(12): 2603-2618.
- [7] Holly LT, Schwender JD, Rouben DP, et al. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: indications, technique, and complications [J]. Neurosurg Focus, 2006, 20(3): E6.
- [8] Karikari IO, Isaacs RE. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: a review of techniques and outcomes [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2010, 35(26 Suppl): 294-301.
- [9] Lau D, Khan A, Terman SW, et al. Comparison of perioperative outcomes following open versus minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion in obese patients [J]. Neurosurg Focus, 2013, 35(2): E10.
- [10] Tian W, Liu YJ, Liu B, et al. Guideline for thoracolumbar pedicle screw placement assisted by orthopaedic surgical robot [J]. Orthop Surg, 2019, 11(2): 153-159.
- [11] Chang M, Wang L, Yuan S, et al. Percutaneous endoscopic robot-assisted transforaminal lumbar interbody fusion (PE RA-TLIF) for lumbar spondylolisthesis: a technical note and two years clinical results [J]. Pain Physician, 2022, 25(1): 73-86.

指导专家:

冯世庆 山东大学齐鲁第二医院

编写专家组成员(按姓氏汉语拼音排序):

陈博来 广东省中医院骨科

段婉茹 首都医科大学宣武医院神经外科

杜伟 烟台山医院脊柱外科

杜付鑫 山东大学机械工程学院

冯世庆 山东大学齐鲁第二医院

丰荣杰 山大第一医科大学附属省立医院

何达 北京积水潭医院脊柱外科

郝延科 山东中医药大学附属医院脊柱骨科

刘鹏 吉林大学第三医院脊柱外科

刘亚军 北京积水潭医院脊柱外科

李慧武 上海交通大学医学院附属第九人民医院骨科

刘新宇 山东大学齐鲁医院脊柱外科

宁广智 天津医科大学总医院骨外科

宋滇文 上海市第一人民医院骨科

沈洪兴 上海交通大学医学院附属仁济医院脊柱外科

宋若先 中国人民解放军联勤保障部队第九六〇医院脊柱外科

田永昊 山东大学齐鲁医院脊柱外科

王连雷 山东大学齐鲁医院脊柱外科

王辉 山东大学齐鲁医院脊柱外科

万勇 中山大学附属第一医院脊柱外科

王亮 南方医科大学第三医院脊柱外科

王大川 山东大学齐鲁第二医院脊柱外科

吴东进 山东大学齐鲁第二医院脊柱外科

王延国 山东大学齐鲁医院(青岛)脊柱外科

王鹏 济南市中心医院脊柱外科

吴南 北京协和医院骨科

原所茂 山东大学齐鲁医院脊柱外科

杨强 天津大学天津医院脊柱外科

赵轶波 山西医科大学第二医院脊柱外科

张扬 空军军医大学西京医院脊柱外科

赵宇 北京协和医院脊柱外科

执笔专家:王连雷,王辉

利益冲突:所有编者声明不存在利益冲突

免责声明:本专家共识基于专家经验和现有研究报道的总结,为RA-TLIF技术在腰椎退行性疾病的相关诊疗提供参考,非医疗决策唯一准则,不保证适用于所有情况,不承担因依据本共识所作决策产

- [12] Jacofsky DJ, Allen M. Robotics in arthroplasty: a comprehensive review[J]. *J Arthroplasty*, 2016, 31(10): 2353-2363.
- [13] 吴闻文, 李振宙, 商卫林, 等. 改良微创 TLIF 技术治疗腰椎间盘突出性腰痛[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2011, 17(5): 298-303.
WU Wenwen, LI Zhenzhou, SHANG Weilin, et al. Application of modified mini-TLIF technique to treat discogenic back pain [J]. *Chinese Journal of Pain Medicine*, 2011, 17(5): 298-303.
- [14] 李立钧, 李昕, 潘杰, 等. 双侧微创经椎间孔腰椎间融合术治疗峡部裂性腰椎滑脱[J]. *中华外科杂志*, 2009, 47(20): 1593-1594.
- [15] Garg B, Mehta N. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MI-TLIF): a review of indications, technique, results and complications [J]. *J Clin Orthop Trauma*, 2019, 10(Suppl 1): 156-162.
- [16] Badlani N, Yu E, Kreitz T, et al. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) [J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(2): 62-64.
- [17] Wang L, Li C, Wang Z, et al. Comparison of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion for degenerative lumbar spinal diseases: 2-year follow-up [J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(2): 473-485.
- [18] 周跃. 腰椎滑脱症的微创减压、复位与融合内固定术[J]. *中华骨科杂志*, 2011, 24(10): 1175-1180.
- [19] 中华医学会麻醉学分会老年人麻醉学组, 北京医学会骨科分会老年学组, 国家老年疾病临床医学研究中心. 高龄脊柱手术患者围手术期多学科评估中国专家共识[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(17): 1245-1257.
- [20] 白玉树, 翟骁, 陈自强, 等. 退变性脊柱侧凸手术加速康复外科围手术期管理策略专家共识[J]. *第二军医大学学报*, 2020, 41(3): 233-242.
- [21] Vasan N, Scherman DB, Kam A. A tale of two robots: operating times and learning curves in robot-assisted lumbar fusion [J]. *J Clin Neurosci*, 2022, 97: 42-48. doi: 10.1016/j.jocn.2021.12.027
- [22] Alsalmi S, Alsofyani M, Bugdadi A, et al. Postoperative outcome of robot-assisted transforaminal lumbar interbody fusion: a pilot study [J]. *Asian J Neurosurg*, 2021, 16(4): 759-764.
- [23] Gao S, Wei J, Li W, et al. Accuracy of robot-assisted percutaneous pedicle screw placement under regional anesthesia: a retrospective cohort study [J]. *Pain Res Manag*, 2021, 2021: 6894001. doi: 10.1155/2021/6894001
- [24] 张嘉琦, 胡量子. 术中肺保护性通气策略的研究进展[J]. *创伤外科杂志*, 2023, 25(5): 393-398.
ZHANG Jiaqi, HU Liangzi. Intraoperative lung protective ventilation: recent research progress [J]. *Journal of Traumatic Surgery*, 2023, 25(5): 393-398.
- [25] Ren Y, Liu J, Nie X, et al. Association of tidal volume during mechanical ventilation with postoperative pulmonary complications in pediatric patients undergoing major scoliosis surgery [J]. *Paediatr Anaesth*, 2020, 30(7): 806-813.
- [26] Hager DN, Brower RG. Customizing lung-protective mechanical ventilation strategies [J]. *Crit Care Med*, 2006, 34(5): 1554-1555.
- [27] 李玉希, 黄浚桑, 刘婷, 等. 脊柱手术机器人在脊柱外科手术中的应用进展 [J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2021, 2(2): 143-150.
LI Yuxi, HUANG Junshen, LIU Ting, et al. Application progress of spinal surgical robot [J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2021, 2(2): 143-150.
- [28] 刘新宇, 原所茂, 田永昊, 等. 微创经椎间孔腰椎椎体间融合术内固定相关并发症及对策 [J]. *中华骨科杂志*, 2016, 29(22): 1426-1434.
LIU Xinyu, YUAN Suomao, TIAN Yonghao, et al. Instrumentation related complication of lumbar degenerative disc diseases treated by minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS-TLIF) [J]. *Chinese Journal of Orthopaedics*, 2016, 29(22): 1426-1434.
- [29] Wang L, Li H, Zhao Y, et al. Ligamentum-preserved/temporary preserved minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion for lumbar spondylolisthesis: technical note and 2-year follow-up [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2022, 47(8): 328-336.
- [30] Han X, Tian W, Liu Y, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: a prospective randomized controlled trial [J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 30(5): 615-622.
- [31] Roser F, Tatagiba M, Maier G. Spinal robotics: current applications and future perspectives [J]. *Neurosurgery*, 2013, 72 (Suppl 1): 12-18.
- [32] Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, et al. Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic-guided spinal instrumented fusions: a randomized controlled trial [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2017, 42(6): 353-358.
- [33] Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, et al. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(6): 860-868.
- [34] Zhang Q, Xu YF, Tian W, et al. Comparison of superior-level facet joint violations between robot-assisted percutaneous pedicle screw placement and conventional open fluoroscopic-guided pedicle screw placement [J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(5): 850-856.
- [35] Hu X, Lieberman IH. What is the learning curve for robotic-assisted pedicle screw placement in spine surgery? [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(6): 1839-1844.

- [36] Kim MC, Chung HT, Cho JL, et al. Subsidence of polyetheretherketone cage after minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(2): 87-92.
- [37] Cui GY, Han XG, Wei Y, et al. Robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion in the treatment of lumbar spondylolisthesis [J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(7): 1960-1968.
- [38] Smith JS, Shaffrey CI, Sansur CA, et al. Rates of infection after spine surgery based on 108,419 procedures: a report from the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Committee[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(7): 556-563.
- [39] Garcia D, Akinduro OO, De Biase G, et al. Robotic-assisted vs nonrobotic-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: a cost-utility analysis [J]. *Neurosurgery*, 2022, 90(2): 192-198.
- [40] Zhang Q, Han XG, Xu YF, et al. Robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw placement in transforaminal lumbar interbody fusion for lumbar degenerative disease [J]. *World Neurosurg*, 2019, 125: 429-434. doi: 10.1016/j.wneu.2019.01.097
- [41] Schröder ML, Staartjes VE. Revisions for screw malposition and clinical outcomes after robot-guided lumbar fusion for spondylolisthesis[J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(5): E12. doi: 10.3171/2017.3.FOCUS16534
- [42] 朱晓龙, 王建, 周跃, 等. 微创经椎间孔腰椎椎体间融合术的围手术期并发症[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2016, 26(4): 304-309.
ZHU Xiaolong, WANG Jian, ZHOU Yue, et al. Perioperative complications of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *Chinese Journal of Spine and Spinal Cord*, 2016, 26(4): 304-309.
- [43] Babu R, Park JG, Mehta AI, et al. Comparison of superior-level facet joint violations during open and percutaneous pedicle screw placement[J]. *Neurosurgery*, 2012, 71(5): 962-970.
- [44] Fogel GR, Toohey JS, Neidre A, et al. Fusion assessment of posterior lumbar interbody fusion using radiolucent cages: X-ray films and helical computed tomography scans compared with surgical exploration of fusion[J]. *Spine J*, 2008, 8(4): 570-577.
- [45] Lee K, Lee KM, Park MS, et al. Measurements of surgeons' exposure to ionizing radiation dose during intraoperative use of C-arm fluoroscopy [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(14): 1240-1244.
- [46] Riis J, Lehman RR, Perera RA, et al. A retrospective comparison of intraoperative CT and fluoroscopy evaluating radiation exposure in posterior spinal fusions for scoliosis[J]. *Patient Saf Surg* 2017, 11: 32. doi: 10.1186/s13037-017-0142-0
- [47] De Biase G, Gassie K, Garcia D, et al. Perioperative comparison of robotic-assisted versus fluoroscopically guided minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *World Neurosurg*, 2021, 149: 570-575. doi: 10.1016/j.wneu.2021.01.133
- [48] Han XG, Tang GQ, Han X, et al. Comparison of outcomes between robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion and oblique lumbar interbody fusion in single-level lumbar spondylolisthesis [J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(7): 2093-2101.
- [49] Kochanski RB, Lombardi JM, Laratta JL, et al. Image-guided navigation and robotics in spine surgery[J]. *Neurosurgery*, 2019, 84(6): 1179-1189.
- [50] Ver MLP, Gum JL, Crawford CH, et al. Index episode-of-care propensity-matched comparison of transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) techniques: open traditional TLIF versus midline lumbar interbody fusion (MIDLIF) versus robot-assisted MIDLIF [J]. *J Neurosurg Spine*, 2020, 32(5): 741-747.
- [51] Yang JS, He B, Tian F, et al. Accuracy of robot-assisted percutaneous pedicle screw placement for treatment of lumbar spondylolisthesis: a comparative cohort study [J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 2479-2487. doi: 10.12659/MSM.913124
- [52] Dalton T, Sykes D, Wang TY, et al. Robotic-assisted trajectory into kamin's triangle during percutaneous transforaminal lumbar interbody fusion-initial case series investigating safety and efficacy [J]. *Oper Neurosurg*, 2021, 21(6): 400-408.
- [53] Cui GY, Tian W, He D, et al. Effects of robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion and traditional open surgery in the treatment of lumbar spondylolisthesis [J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2017, 55(7): 543-548.
- [54] Lv Y, Chen M, Wang SL, et al. Endo-TLIF versus MIS-TLIF in 1-segment lumbar spondylolisthesis: a prospective randomized pilot study [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2022, 212: 107082. doi: 10.1016/j.clineuro.2021.107082
- [55] Gong J, Huang X, Luo L, et al. Radiation dose reduction and surgical efficiency improvement in endoscopic transforaminal lumbar interbody fusion assisted by intraoperative o-arm navigation: a retrospective observational study[J]. *Neurospine*, 2022, 19(2): 376-384.
- [56] Porche K, Samra R, Melnick K, et al. Enhanced recovery after surgery (ERAS) for open transforaminal lumbar interbody fusion: a retrospective propensity-matched cohort study[J]. *Spine J*, 2022, 22(3): 399-410.
- [57] Cheh G, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Adjacent segment disease following lumbar/thoracolumbar fusion with pedicle screw instrumentation: a minimum 5-year follow-up [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(20): 2253-2257.