

实时三维导航辅助微创经椎间孔腰椎椎间融合术后腰骶部矢状位平衡参数变化分析

马承榕¹▲, 陈焕雄², 李国军¹, 何小元², 王良盛¹, 黄涛², 孟志斌²

(1. 海南医学院研究生院, 海南 海口 570216; 2. 海南医学院第一附属医院脊柱骨病外科, 海南 海口 570102)

【摘要】 目的: 探讨实时三维导航辅助微创经椎间孔腰椎椎间融合术 (minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion, MIS-TLIF) 与传统开放 TLIF 术治疗腰椎退行性疾病后腰骶部矢状位参数的动态变化。方法: 回顾性分析 2017 年 9 月至 2019 年 9 月行单节段手术治疗的腰椎退行性疾病患者 61 例。其中导航辅助 MIS-TLIF 组患者 31 例, 传统开放 TLIF 组患者 30 例。收集两组患者的基本信息、手术时间、术中出血量, 测量患者术前及术后 3 个月随访时矢状位影像学参数: 腰椎前凸角 (lumbar lordosis, LL), 节段前凸角 (segmental lordosis, SL), 骨盆入射角 (pelvic incidence, PI), 骨盆倾斜角 (pelvic tilt, PT), 骶骨倾斜角 (sacral slope, SS), 融合节段的椎间隙前高 (anterior disc height, ADH) 和椎间隙后高 (posterior disc height, PDH), 计算椎间隙平均高度 (disc height, DH), 骨盆-腰椎匹配值 (pelvic incidence to lumbar lordosis mismatch, PI-LL)。结果: 导航辅助 MIS-TLIF 组手术时间、术中出血量显著少于传统开放 TLIF 组 ($P < 0.05$)。导航辅助 MIS-TLIF 组患者术后 3 个月的 LL、SL、PI-LL、DH 与术前比较有明显改善 ($P < 0.05$), 而 PI、PT、SS 与术前相比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。传统开放 TLIF 组患者术后 3 个月的 LL、PI-LL、DH 与术前比较有明显改善 ($P < 0.05$), 而 PI、PT、SS、SL 与术前比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。LL 的改变值与 SL 的改变值 ($r = 0.433, P < 0.05$) 有显著相关性; SL 的改变值与 ADH 的改变值 ($r = 0.621, P < 0.05$), PDH 的改变值 ($r = 0.527, P < 0.05$) 有显著相关性。结论: 实时导航辅助 MIS-TLIF 与开放 TLIF 治疗腰椎退行性疾病患者在短期内均可恢复 DH, 改善 LL 及 PI-LL, 使术后腰骶部矢状面序列的排列更为协调, 但只有导航辅助 MIS-TLIF 能显著提高 SL。与开放 TLIF 相比, 实时导航辅助 MIS-TLIF 治疗腰椎退行性疾病患者具有手术时间短、术中出血少等优点。

【关键词】 腰椎退行性疾病; 脊柱融合术; 成像, 三维

中图分类号: R681.55

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2021.04.004

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Analysis of lumbosacral sagittal balance parameter variation in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with real-time 3D navigation techniques MA Cheng-rong, CHEN Huan-xiong, LI Guo-jun, HE Xiao-yuan, WANG Liang-sheng, HUANG Tao, and MENG Zhi-bin*. *Department of Spine and Osteopathic Surgery, the First Affiliated Hospital of Hainan Medical University, Haikou 570102, Hainan, China

ABSTRACT Objective: To explore the dynamic changes of lumbosacral sagittal parameters after real-time three-dimensional navigation assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS-TLIF) and traditional open TLIF for treatment of lumbar degenerative disease. **Methods:** The clinical data of 61 patients with lumbar degenerative disease underwent single-segment surgery from September 2017 to September 2019 were retrospectively analyzed. Among them, 31 cases underwent MIS-TLIF with 3D navigation techniques (MIS-TLIF group) and another 30 cases underwent conventional open TLIF (traditional open TLIF group). The basic information, operative time and intraoperative blood loss were collected. The sagittal radiologic parameters were measured before surgery and 3 months after surgery, including lumbar lordosis (LL), segmental lordosis (SL), pelvic incidence (PI), pelvic tilt (PT), sacral slope (SS), anterior disc height (ADH), posterior disc height (PDH). And the average disc height (DH) and pelvic incidence to lumbar lordosis mismatch (PI-LL) were calculated. **Results:** Operative time and intraoperative blood loss in MIS-TLIF group were significantly less than in traditional open TLIF group ($P < 0.05$). In MIS-TLIF group, LL, SL, PI-LL, and DH were significantly improved at 3 months after surgery ($P < 0.05$), while PI, PT, and SS were not statistically different from those before surgery ($P > 0.05$). LL, PI-LL, and DH of patients in the

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目 (编号: 819QN365)

Fund program: Youth Fund Project of Natural Science Foundation of Hainan (No.819QN365)

通讯作者: 孟志斌 E-mail: zhibinmeng@163.com

Corresponding author: MENG Zhi-bin E-mail: zhibinmeng@163.com

▲现工作单位: 金华市人民医院骨一科, 浙江 金华 321000

traditional open TLIF group were significantly improved at 3 months after surgery ($P<0.05$), while the PI, PT, SS, and SL were not statistically different from those before surgery ($P>0.05$). LL change showed a significant correlation with SL change ($r=0.433, P<0.001$). Change in SL closely correlated to change in ADH ($r=0.621, P<0.05$) and PDH ($r=0.527, P<0.05$). **Conclusion:** Real-time navigation-assisted MIS-TLIF and traditional open TLIF can recover DH in a short term for lumbar degenerative diseases, improve LL and PI-LL, and make the arrangement of the sagittal plane of the lumbosacral region more coordinated after surgery. But only the navigation assisted MIS-TLIF can significantly improve SL. Compared with traditional open TLIF, real-time navigation assisted MIS-TLIF in the treatment of degenerative lumbar diseases has the advantages of short operation time and less intraoperative bleeding.

KEYWORDS Degenerative lumbar disease; Spinal fusion; Imaging, Three-dimensional

微创经椎间孔入路腰椎体间融合术 (minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion, MIS-TLIF) 是由 Foley 等^[1]于 21 世纪初期提出, 与 TLIF 术式相比, 该术式在解除神经根压迫的同时能够减少术中肌肉和软组织牵拉, 缓解患者术后的腰背部疼痛, 同时具有降低切口感染率及缩短住院时间的优势^[2-6]。近年来, 有研究报道了椎体间融合技术恢复腰椎前凸的能力及对脊柱-骨盆矢状面参数的影响^[7-12]。然而, 有关三维导航辅助 Quadrant 通道下 MIS-TLIF 术治疗腰椎退行性疾病后腰椎放射线参数变化及矢状面平衡恢复的研究国内外少见报道。本研究旨在比较实时三维导航辅助微创经椎间孔腰椎椎体间融合术与传统开放 TLIF 术治疗腰椎退行性疾病后腰骶部矢状位参数的动态变化。

1 资料与方法

1.1 病例选择

纳入标准: 符合腰椎退行性疾病的诊断且伴有明显的腰腿麻痛或间歇性跛行等临床症状; 经过严格保守治疗不小于 3 个月后上述症状未见减轻; 患者术前及术后随访时有完整影像学资料并且不影响测量。

排除标准: 既往因脊柱退行性腰椎融合或非融合手术治疗; 既往因脊柱创伤、感染、脊柱结核、脊柱肿瘤等行手术治疗; 骨盆、髋关节或下肢疾患影响站立; 行双节段或多个节段手术治疗。

1.2 一般资料

2017 年 9 月至 2019 年 9 月共纳入单节段手术治疗的 61 例, 其中导航辅助 MIS-TLIF 组患者

31 例, 传统开放 TLIF 组患者 30 例。两组患者一般资料情况见表 1。

1.3 治疗方法

全麻后患者取俯卧位, 行大脑皮层体感诱发电位/运动诱发电位全程神经电生理监护^[13]。

导航辅助 MIS-TLIF 组: 启动三维导航设备, 通过 2 枚克式针将导航参考架固定于患者髂后上棘, 进行三维 C 形臂 X 线扫描。扫描图像经网络自动传送到导航工作站, 并重建为三维图像。使用导航探针在 3D 影像引导下定位手术节段, 并在体表投影点标记切口位置。距后正中线上旁开长约 4 cm 切口后依次切开皮肤及腰背肌筋膜, 钝性分离组织至小关节处, 由小到大依次插入可扩张 Quadrant 通道, 撑开肌间隙后再接通光源。在三维导航系统辅助下, 选择最佳置钉水平角及矢状角, 高速磨钻制备钉道, 球探探查钉道为骨性结构后, 攻丝、置入椎弓根螺钉。在导航辅助下确定截骨及减压的范围后, 用骨刀凿除下关节突, 枪式咬骨钳咬除残余关节突及皱缩的黄韧带并扩大椎间孔, 以显露硬膜囊及受压的神经根。止血至术野清晰后, 固定多根神经拉钩, 避免术中操作误伤硬膜囊或神经根。清除软骨终板, 制备椎间融合植骨床, 置入自体骨及融合器, 导航辅助下调节融合器的位置及深度, 并上棒、加压拧紧螺帽。透视确认融合器及钉棒系统位置满意后依次缝合自筋膜层至皮肤。

TLIF 组: 在 C 形臂 X 线透视下采用长针头定位手术节段上下椎弓根影, 选择后正中连线为切口。依次切开皮肤、皮下组织及腰背筋膜, 骨膜下剥离椎旁

表 1 两组腰椎退行性疾病患者基线资料比较

Tab.1 Comparison of baseline data of patients with degenerative lumbar disease between two groups

组别	例数	年龄($\bar{x}\pm s$, 岁)	性别(例)		临床诊断(例)		手术节段(例)	
			男	女	腰椎间盘突出症	退变性腰椎管狭窄症	L _{4,5}	L ₅ S ₁
MIS-TLIF 组	31	51.2±12.6	15	16	18	13	25	6
传统开放 TLIF 组	30	51.6±11.6	13	17	16	14	22	8
检验值		$t=-1.110$	$\chi^2=0.157$		$\chi^2=0.138$		$\chi^2=0.461$	
P 值		0.857	0.692		0.710		0.497	

肌,显露后侧椎板、横突尖部及关节突结构,椎板拉钩牵开以充分暴露术野。显露完成后,结合术前影像学并参照“人”字嵴顶点判断进钉点,腰椎椎弓根钉一般内倾 15°~20°,开路锥进深 40~45 mm,圆头探针触探椎弓根四壁及椎体前壁的完整性,插入 Mark 针,C 形臂 X 线机行正侧位透视以评估钉道情况,位置满意后行椎弓根螺钉置入。直视下完成神经根减压,椎间隙处理及植骨融合操作,步骤与导航组一致。

1.4 观察项目与方法

(1)一般情况观察:记录手术时间,术中出血量,围术期血管、神经、切口相关并发症情况。(2)影像学参数及测量:术前及术后 3 个月随访时拍摄腰椎侧位 X 线片或脊柱全长侧位片,使用 Surgimap (Version:2.2.13.1) 软件测量腰骶部矢状位平衡参数(图 1),测量方法参照 McMordie 等^[14]与 Champagne 等^[15]描述。①腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL):L₁ 椎体上终板切线与 S₁ 终板切线之间的夹角;②骨盆入射角(pelvic incidence, PI):骶骨终板中点与双侧股骨头中心所连直线与 S₁ 上终板垂线形成的夹角;③骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT):骶骨终板中点与双侧股骨头中心所连直线与水平垂线形成的夹角;④骶骨倾斜角(sacral slope, SS):骶骨上终板切线与水平线之间的夹角;⑤节段前凸角(segmental lordosis, SL):手术节段上位椎体下终板切线与下位椎体上终板切线之间的夹角;⑥椎间隙高度(disc height, DH):手术节段椎间隙前缘高度(anterior disc height, ADH)与椎间隙后缘高度(posterior disc height, PDH)的均值;⑦骨盆-腰椎匹配值(pelvic incidence to lumbar lordosis mismatch, PI-LL),其计算方式为 PI 与 LL 的差值。

1.5 统计学处理

采用 SPSS 19.0 软件进行统计学分析,定量数据以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,性别、诊断、手术节段构成比采用卡方检验,年龄、手术时间、出血量、腰椎-骨盆放射线参数等定量参数采用 Shapiro-Wilk 检验是否呈正态分布,正态分布资料采用独立样本 *t* 检验,非正态分布资料采用曼-惠特尼检验;比较术前与末次随访时腰椎-骨盆影像学参数的动态改变,正

态分布资料采用配对样本 *t* 检验,非正态分布资料采用配对 Wilcoxon 检验。采用线性回归分析探究腰椎-骨盆放射线参数改变值的相互联系。差异显著性标准为 *P*<0.05。

2 结果

2.1 一般情况观察结果

所有病例获得随访,时间 3~24(12.0±3.1)个月。导航辅助 MIS-TLIF 组手术时间为(107.2±20.4) min,术中出血为(131.8±41.5) ml,少于传统开放 TLIF 组的(146.5±22.1) min 和(206.7±45.9) ml(*P*<0.05)。在围术期并发症方面,两组患者术中均未输血治疗,术后并没有出现血管、神经、切口感染等并发症。随访中导航辅助 MIS-TLIF 组 1 例 52 岁女性患者术后 3 个月出现单侧螺钉松动、固定棒移位,无根性疼痛及肢体麻木症状,继续随访观察。

2.2 影像学参数变化情况

导航辅助 MIS-TLIF 组患者术后 3 个月的 LL、SL、PI-LL、DH 与术前比较,得到明显改善(*P*<0.05),而 PI、PT、SS 与术前相比较,差异无统计学意义(*P*>0.05)。见表 2。

传统开放 TLIF 组患者术后 3 个月的 LL、PI-LL、DH 与术前比较,得到明显改善(*P*<0.05),而 PI、PT、SS、SL 与术前比较,差异无统计学意义(*P*>0.05)。见表 3。

2.3 腰椎-骨盆放射线参数变化的相关性分析

通过线性回归分析发现,SL 的改变值与 ADH 的改变值(*r*=0.621, *P*<0.05),PDH 的改变值(*r*=0.527, *P*<0.05)有显著相关性(见图 1)。LL 的改变值与 SL 的改变值(*r*=0.433, *P*<0.05)有显著相关性(见图 2)。典型病例见图 3。

3 讨论

3.1 导航辅助 MIS-TLIF 对腰椎矢状面平衡的影响

行椎间融合手术时,恢复正常的腰椎矢状面排列是需要引起关注的一个方面。既往有国外研究就报道了 MIS-TLIF 手术对矢状面平衡的影响。在 2016 年,Choi 等^[16]报道 21 例脊柱退行性变患者术后 12 个月随访时,LL 及 SL 较术前明显改变,分别

表 2 MIS-TLIF 组 31 例腰椎退行性疾病患者术前及术后 3 个月时骨盆-腰椎影像学参数比较($\bar{x}\pm s$)

Tab.2 Comparison of pelvis-lumbar imaging parameters between pre-operation and 3 months after operation in MIS-TLIF group with degenerative lumbar disease($\bar{x}\pm s$)

时间	LL(°)	PI(°)	PT(°)	SS(°)	PI-LL(°)	SL(°)	ADH(mm)	PDH(mm)	DH(mm)
术前	39.4±12.3	47.4±7.2	15.7±7.3	31.7±7.3	8.0±13.7	7.2±5.3	14.7±2.9	9.5±2.3	12.1±1.9
术后 3 个月	43.9±11.1	47.4±7.1	15.1±7.9	32.3±6.9	3.5±11.9	9.5±4.2	16.6±3.3	10.0±2.2	13.2±2.1
<i>t</i> 值	2.647	-0.133	-0.483	0.474	-2.597	2.863	3.826	1.464	3.824
<i>P</i> 值	<0.05	0.895	0.633	0.639	<0.05	<0.05	<0.05	0.154	<0.05

表 3 TLIF 组 30 例腰椎退行性疾病患者术前及术后 3 个月随访时骨盆-腰椎影像学参数比较($\bar{x}\pm s$)

Tab.3 Comparison of pelvis-lumbar imaging parameters between pre-operation and 3 months after operation in TLIF group with degenerative lumbar disease($\bar{x}\pm s$)

时间	LL(°)	PI(°)	PT(°)	SS(°)	PI-LL(°)	SL(°)	ADH(mm)	PDH(mm)	DH(mm)
术前	38.1±12.9	48.8±7.4	18.7±6.4	30.2±8.1	10.7±8.9	5.0±6.2	12.9±3.3	9.9±2.2	11.4±1.8
术后 3 个月	44.1±10.0	48.8±7.3	17.2±6.3	31.6±7.9	4.7±8.5	6.5±4.9	14.7±2.1	10.8±2.0	12.8±1.5
t 值	3.241	0.626	-1.782	1.751	-3.933	1.390	3.850	2.078	4.147
P 值	<0.05	0.536	0.096	0.102	<0.05	0.175	<0.05	<0.05	<0.05

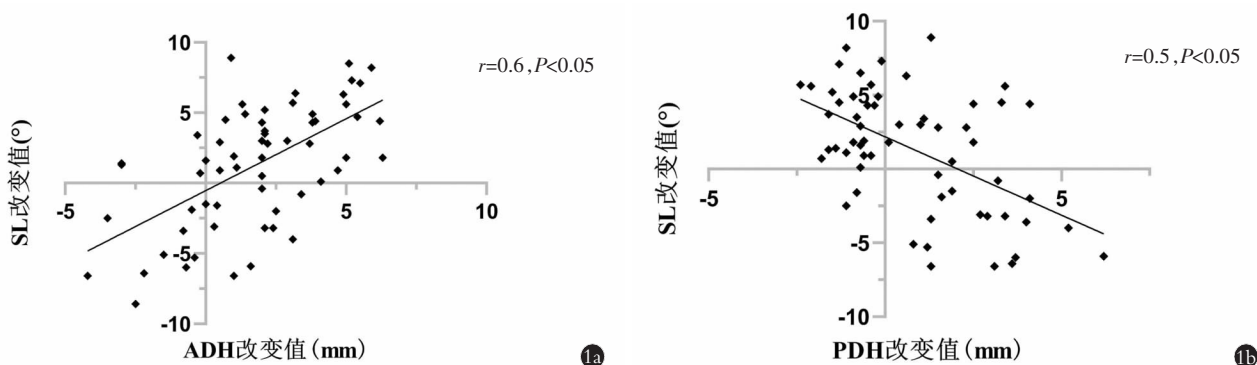


图 1 SL 改变值与对应 ADH、PDH 改变值的变化趋势散点图

Fig.1 Scatterplot with trend line showing change in SL compared to change in ADH and PDH at corresponding level

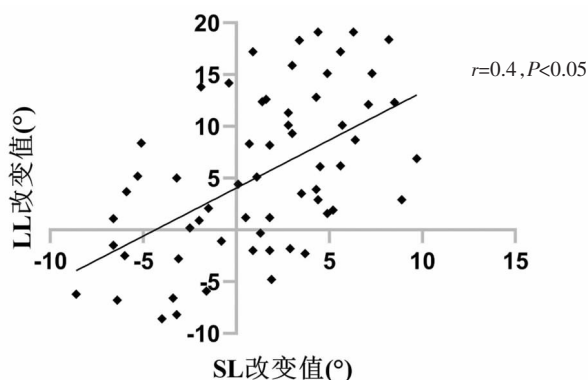


图 2 LL 改变值与对应 SL 改变值的变化趋势散点图

Fig.2 Scatterplot with trend line showing change in LL compared to change in SL at corresponding level

增加 2.8° 及 2.2°。Isaacs 等^[17]报道称 MIS-TLIF 术后 LL 及 SL 分别增加 2.6° 及 0.3°。Su 等^[18]采用 MIS-TLIF 治疗 25 例退行性滑脱的患者,随访时 SL 及 LL 均较术前减小。本研究中,至术后 3 个月时,导航辅助 MIS-TLIF 的患者 LL 达到 (43.9±11.1)°,SL 达到 (9.5±4.2)°,较术前分别增加(4.5±9.6)°、(2.3±4.4)°。而 TLIF 组患者 LL 达到 (44.1±10.0)°,较术前增加(6.0±9.4)°,SL 较术前无明显变化,仅仅增加(1.5±6.4)°。根据 Hasegawa 等^[19]提出的理想 LL 计算公式,即 LL=32.9+0.60×PI-0.23×年龄,可知纳入本次研究的导航辅助 MIS-TLIF 患者的理想 LL 值[患者术前 PI 值为(47.4±7.2)°,平均年龄为(51.2±12.6)岁]为 49.6°,而开放 TLIF 组患者的理想 LL 值[患者术前

PI 值为(48.8±7.4)°,平均年龄为(51.6±11.6)岁]为 50.3°,说明两种手术方式均能够改善腰椎前凸,患者术后矢状面平衡更为协调。

年龄增长、软组织损伤及吸烟等相关因素会加速椎间盘脱水退变并导致椎间隙狭窄及椎间孔高度的降低,而通过微创手术恢复 DH 能够对受压迫的神经根起到间接减压的作用。McMordie 等^[14]报道了行单节段、双节段 MIS-TLIF 手术后患者 DH 的改变,发现末次随访时单节段手术患者的 DH 及椎间孔高度较术前分别提高 5.8 mm、4.8 mm,双节段患者的 DH 及椎间孔高度较术前分别提高 6.5 mm、3.8 mm。Pereira 等^[20]回顾性分析了 117 例患者手术节段及邻近节段 ADH 及 PDH 的动态改变,发现患者术后 ADH、PDH 明显增加恢复,变化幅度分别为 1.0 mm、0.9 mm。Choi 等^[21]对含两种类型融合器行 MIS-TLIF 手术的 84 例患者分析,发现弯形融合器沉降率更高,而 DH 的变化并无差异,说明融合器的类型对术后 DH 恢复并无影响。Kepler 等^[22]通过研究发现置入融合器的深度与 DH 的恢复有密切联系,而 DH 恢复较好的患者其临床疗效也往往更好。本研究中,两组患者手术节段 ADH、PDH 较术前增加,说明两种手术方式通过融合器支撑有效提高了 DH。在导航辅助 MIS-TLIF 组中,术者通过计算机导航调整融合器位置与深度,将融合器置入融合节段的前方,进而影响手术节段 ADH 与 PDH 的大小,使 ADH 的变化较 PDH 的变化相对明显,这可能是 SL

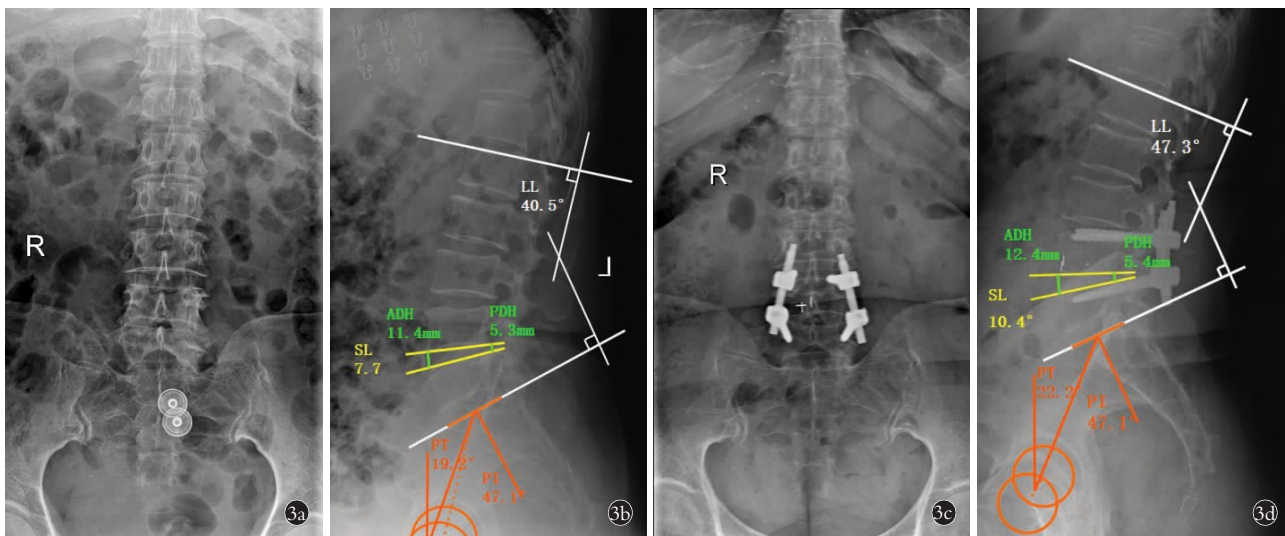


图 3 患者女性,61 岁,诊断为退行性腰椎管狭窄症,实时三维导航辅助下行 MIS-TLIF 手术(L_{4,5}) **3a,3b.** 患者术前腰椎正侧位 X 线片示 LL 为 40.5°,SL 为 7.7°,ADH、PDH 分别为 11.4 mm、5.3 mm,PI 为 47.1°,PT 为 19.2°,SS 为 27.9°,计算得 DH 为 8.4 mm,PI-LL 为 6.6° **3c,3d.** 术后 3 个月腰椎正侧位 X 线片示 LL 为 47.3°,SL 为 10.4°,ADH、PDH 分别为 12.4 mm、5.4 mm,PI 为 47.1°,PT 为 22.2°,SS 为 24.9°,计算得 DH 为 8.9 mm,PI-LL 为 -0.2°

Fig.3 A 61-year-old female patient with L_{4,5} degenerative lumbar spinal stenosis was treated with minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with real-time 3D navigation **3a,3b.** Preoperative LL was 40.5°,SS was 7.7°, ADH and PDH were 11.4 mm and 5.3 mm, respectively,PI was 47.1°, PT was 19.2°,SS was 27.9°,and DH of 8.4mm and PI-LL 6.6° were calculated **3c,3d.** Three months after operation, the lumbar AP and lateral X-rays showed LL of 47.3°,SS 10.4°,ADH 12.4 mm,PDH 5.4mm,PI 47.1°,PT 22.2°,SS 24.9°,and DH 8.9 mm,PI-LL -0.2°

较术前代偿性增加的原因之一。而随着 SL 的改变,整体 LL 发生相应变化。另外,除了术后手术节段 DH 恢复,椎间孔的高度也可能增加。

3.2 导航辅助 MIS-TLIF 术的优势及局限性

计算机辅助手术导航系统的工作原理是利用计算机图象重建技术对术中影像学资料进行数字化处理,术者通过显示屏观察手术器械的实时位置和空间运动轨迹,从三维各个角度选择手术路径,完成手术操作。与传统开放 TLIF 相比,导航辅助 MIS-TLIF 术具有一定的优势。三维导航技术除了在红外示踪反射球引导下置入椎弓根螺钉,还包括皮肤切口的精确规划、通道位置与角度的精准建立、截骨及减压范围的确定、椎间隙的处理、融合器位置及深度的调整。此外,实时计算机 Quadrant 系统 MIS-TLIF 技术提高了置钉的精确性,减少了术中出血,同时有效避免了术中不断的进行 X 线透视,降低了医护人员的放射线暴露,提高了手术的安全性^[23-24]。

但实时计算机 Quadrant 系统 MIS-TLIF 技术也存在一定的局限性,主要包括:(1)Quadrant 通道缩小了手术医师及助手的视野,改变了其常规开放手术的习惯,术中发生硬膜撕裂时较开放手术更难处理^[25]。(2)配套工具注册费时间。(3)红外反射球是消耗材料,反射层极易脱落,多次使用影响精度。(4)导航参考架与反射球位置发生移位或术中光路被遮挡,将导致导航图像的漂移。实际上,计算机人体脊

柱导航漂移是绝对的,因为椎体的结构不规则,没有明确定位标志,导致单个椎体无法精确固定。而通过在脊柱不规则的椎体上建立精确定位校准系统有助于克服导航漂移的问题。

3.3 本研究的局限性和不足之处

该回顾性研究纳入的对象局限于行单节段手术的患者,未对所有手术治疗的患者进行分析。此外,本研究未统计术后融合率、融合器沉降率及分析其与临床疗效之间的关系。最后,本研究随访时间较短,对一些参数的准确评估欠充分,对于矢状面平衡参数的长期变化及术后邻近节段退变情况等相关研究仍需要长期随访。

参考文献

- [1] Foley KT,Holly LT,Schwender JD. Minimally invasive lumbar fusion[J]. Spine (Phila Pa 1976),2003,28(15 Suppl):S26-S35.
- [2] Kim JS,Jung B,Lee SH. Instrumented minimally invasive spinal-transforaminal lumbar interbody fusion(MIS-TLIF):Minimum 5-year follow-up with clinical and radiologic outcomes[J]. Clin Spine Surg,2018,31(6):E302-E309.
- [3] Park P,Foley KT. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with reduction of spondylolisthesis:technique and outcomes after a minimum of 2 years' follow-up[J]. Neurosurg Focus,2008,25(2):E16.
- [4] Shunwu F,Xing Z,Fengdong Z,et al. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion for the treatment of degenerative lumbar diseases[J]. Spine (Phila Pa 1976),2010,35(17):1615-1620.

- [5] Peng CW, Yue WM, Poh SY, et al. Clinical and radiological outcomes of minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2009, 34 (13): 1385–1389.
- [6] Pereira P, Buzek D, Franke J, et al. Surgical data and early postoperative outcomes after minimally invasive lumbar interbody fusion: results of a prospective, multicenter, observational data-monitored study [J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0122312.
- [7] Mobbs RJ, Phan K, Malham G, et al. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIIF and ALIF [J]. *J Spine Surg*, 2015, 1(1): 2–18.
- [8] Hsieh PC, Koski TR, O'shaughnessy BA, et al. Anterior lumbar interbody fusion in comparison with transforaminal lumbar interbody fusion: implications for the restoration of foraminal height, local disc angle, lumbar lordosis, and sagittal balance [J]. *J Neurosurg Spine*, 2007, 7(4): 379–386.
- [9] Sharma AK, Kepler CK, Girardi FP, et al. Lateral lumbar interbody fusion: clinical and radiographic outcomes at 1 year: a preliminary report [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2011, 24(4): 242–250.
- [10] Pavlov PW, Meurers H, Van Limbeek J, et al. Good outcome and restoration of lordosis after anterior lumbar interbody fusion with additional posterior fixation [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29 (17): 1893–1899.
- [11] Uribe JS, Myhre SL, Youssef JA. Preservation or restoration of segmental and regional spinal lordosis using minimally invasive interbody fusion techniques in degenerative lumbar conditions: a literature review [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2016, 41 (Suppl): S50–S58.
- [12] Kepler CK, Huang RC, Sharma AK, et al. Factors influencing segmental lumbar lordosis after lateral transpoas interbody fusion [J]. *Orthop Surg*, 2012, 4(2): 71–75.
- [13] 孟志斌, 庞学毅, 黎坚, 等. 运动诱发电位和肌电图联合监测在微创经椎间孔腰椎椎间融合术中的有效性及安全性 [J]. *脊柱外科杂志*, 2019, 17(1): 37–41.
MENG ZB, PANG XY, LI J, et al. Efficacy and safety of motion evoked potential combined with electromyogram in minimally invasive transforaminal lumbar intervertebral fusion [J]. *Ji Zhu Wai Ke Za Zhi*, 2019, 17(1): 37–41. Chinese.
- [14] Memordie JH, Schmidt KP, Gard AP, et al. Clinical and short-term radiographic outcomes of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with expandable lordotic devices [J]. *Neurosurgery*, 2020, 86(2): E147–E155.
- [15] Champagne PO, Walsh C, Diabira J, et al. Sagittal balance correction following lumbar interbody fusion: a comparison of the three approaches [J]. *Asian Spine J*, 2019, 13(3): 450–458.
- [16] Choi WS, Kim JS, Ryu KS, et al. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion at L₅S₁ through a unilateral approach: technical feasibility and outcomes [J]. *Biomed Res Int*, 2016, 2016: 2518394.
- [17] Isaacs RE, Sembrano JN, Tohmeh AG, et al. Two-year comparative outcomes of MIS lateral and MIS transforaminal interbody fusion in the treatment of degenerative spondylolisthesis: Part II: radiographic findings [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2016, 41 (Suppl 8): S133–S144.
- [18] Su K, Luan J, Wang Q, et al. Radiographic analysis of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion versus conventional open surgery on sagittal lumbar-pelvic alignment for degenerative spondylolisthesis [J]. *World Neurosurgery*, 2019, 124: E733–E739.
- [19] Hasegawa K, Okamoto M, Hatsushikano S, et al. Normative values of spino-pelvic sagittal alignment, balance, age, and health-related quality of life in a cohort of healthy adult subjects [J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(11): 3675–3686.
- [20] Pereira C, Silva PS, Cunha M, et al. How does minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion influence lumbar radiologic parameters [J]. *World Neurosurgery*, 2018, 116: E895–E902.
- [21] Choi WS, Kim JS, Hur JW, et al. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion using banana-shaped and straight cages: radiological and clinical results from a prospective randomized clinical trial [J]. *Neurosurgery*, 2018, 82(3): 289–298.
- [22] Kepler CK, Rihn JA, Radcliff KE, et al. Restoration of lordosis and disk height after single-level transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Orthop Surg*, 2012, 4(1): 15–20.
- [23] Peng P, Chen K, Chen H, et al. Comparison of O-arm navigation and microscope-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion and conventional transforaminal lumbar interbody fusion for the treatment of lumbar isthmic spondylolisthesis [J]. *J Orthop Trans*, 2020, 20: 107–112.
- [24] Tian W, Xu YF, Liu B, et al. Computer-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion may be better than open surgery for treating degenerative lumbar disease [J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30(6): 237–242.
- [25] Weiss H, Garcia RM, Hopkins B, et al. A Systematic review of complications following minimally invasive spine surgery including transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2019, 12(3): 328–339.

(收稿日期:2020-11-20 本文编辑:王宏)