

O臂导航在椎弓根发育性狭窄胸腰椎骨折中的精准应用

苏林涛¹, 江剑峰¹, 马俊², 黄亮亮², 雷昌宇¹, 韩尧政¹, 康辉²<https://doi.org/10.12307/2025.156>

投稿日期: 2024-01-04

采用日期: 2024-03-27

修回日期: 2024-04-25

在线日期: 2024-04-29

中图分类号:

R459.9; R318; R683.2

文章编号:

2095-4344(2025)09-01855-08

文献标识码: A

文章快速阅读: O臂导航在椎弓根发育性狭窄胸腰椎骨折中置钉的准确性

对象:

(1) 对椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折患者进行回顾性分析;
(2) 根据手术方式分为O臂组和C臂组。

分组及方法:

(1) 两组在不同设备辅助下行胸腰椎骨折经皮置钉;
(2) 通过术后影像资料, 比较两组置钉的准确性。

结论:

相较于传统透视辅助, O臂导航辅助在椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折患者中行经皮椎弓根螺钉内固定时, 椎弓根破裂率更低、置钉方向更准确。

观察指标:

(1) 测量椎弓根最窄宽度;
(2) 采用解剖学穿孔分级、功能性穿孔分级、实际钉道方向与预期钉道方向角度差来评价置钉准确性。

文题释义:

椎弓根最窄宽度: 过椎弓根上下壁最短距离的连线作垂直椎弓根长轴的横切面, 横切面上椎弓根内外侧骨皮质之间的最短距离即为椎弓根最窄宽度。**O臂导航辅助系统:** 是一种新型的计算机辅助下的导航系统, 它可以实时获取患者的解剖结构信息, 并通过可视化界面帮助术者精确定位和操作, 提高手术精度和治疗效果, 具有高精度图像引导、实时更新解剖信息、改善手术可视性等优点, 目前广泛应用于神经外科、骨科等领域。

摘要

背景: 传统透视辅助治疗椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折时精准置钉存在困难, O臂导航辅助系统在普通的椎弓根置钉中精准性更高, 但关于O臂导航辅助置钉在椎弓根发育狭窄胸腰椎骨折中的应用国内外鲜有报道。**目的:** 探讨O臂导航辅助经皮椎弓根置钉在椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折患者中的准确性。**方法:** 回顾性分析2021年1月至2023年3月中部战区总医院骨科行经皮椎弓根螺钉内固定的53例椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折患者, 其中出现发育性狭窄的椎弓根共208个(患者多处椎弓根发育狭窄的分开统计)。依据手术方式分为2组: O臂导航组98个椎弓根, C臂透视组110个椎弓根。比较两组患者解剖学穿孔评分、功能性穿孔评分、实际与预期钉道的水平面、矢状面角度差等术后影像资料。**结果与结论:** ①两组患者在椎弓根最窄宽度(pow)上没有显著差异($P > 0.05$); 两组患者在不同程度的狭窄分组中(轻度狭窄组: $6 \text{ mm} \leq \text{pow} < 7 \text{ mm}$, 中度狭窄组: $5 \text{ mm} \leq \text{pow} < 6 \text{ mm}$, 重度狭窄组: $\text{pow} < 5 \text{ mm}$)的比例也没有显著差异($P > 0.05$); ②O臂组在解剖学穿孔和功能性的穿孔上的整体等级及评分低于C臂组, 差异有显著性意义($P < 0.001$); 在实际钉道与预期钉道夹角差方面, O臂组实际与预期钉道的角度偏差更小, 差异有显著性意义($P < 0.05$); ③在轻度及中度狭窄组中, O臂组在解剖学穿孔、功能性穿孔以及实际钉道与预期钉道夹角差方面表现出明显的优势, 差异有显著性意义($P < 0.001$); ④O臂组在解剖学穿孔和功能性的穿孔方面整体表现更佳, 尤其在 T_{12} - L_2 节段, 其优势更加显著; 此外, O臂组在各节段的实际钉道与预期钉道夹角差方面均优于C臂组; ⑤因此采用O臂导航辅助经皮置钉治疗椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折, 经皮置钉精准度及安全性更高。**关键词:** 椎弓根发育性狭窄; O臂导航系统; 椎弓根螺钉; 置钉准确性; 经皮置钉; 内固定; 椎弓根破裂; 胸腰椎骨折

Precise application of O-arm navigation system in thoracolumbar fractures with developmental pedicle stenosis

Su Lintao¹, Jiang Jianfeng¹, Ma Jun², Huang Liangliang², Lei Changyu¹, Han Yaozheng¹, Kang Hui²¹School of Medicine, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000, Hubei Province, China; ²Department of Orthopedics, General Hospital of Central Theater Command of PLA, Wuhan 430000, Hubei Province, China

Su Lintao, Master candidate, School of Medicine, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000, Hubei Province, China

Corresponding author: Kang Hui, MD, Associate professor, Department of Orthopedics, General Hospital of Central Theater Command of PLA, Wuhan 430000, Hubei Province, China

Abstract

BACKGROUND: For thoracolumbar spine fractures with developmental stenosis of the vertebral arch, accurate nail placement is difficult using traditional fluoroscopy-assisted techniques. O-arm navigation assistance systems offer higher precision in general vertebral arch nail placement, but there is scarce¹ 武汉科技大学医学院, 湖北省武汉市 430000; ² 中部战区总医院骨科, 湖北省武汉市 430000

第一作者: 苏林涛, 男, 1994年生, 湖北省利川市人, 土家族, 武汉科技大学在读硕士, 主要从事脊柱外科方向研究。

通讯作者: 康辉, 博士, 副教授, 中部战区总医院骨科, 湖北省武汉市 430000

<https://orcid.org/0000-0003-0005-3818> (苏林涛)

基金资助: 湖北省医学青年拔尖人才项目[鄂卫通(2019)48号], 项目负责人: 康辉; 湖北省卫健委面上科研项目(WJ2023M091),

项目负责人: 康辉; 武汉市中青年医学骨干人才培养工程项目[武卫生计生(2017)51号], 项目负责人: 康辉

引用本文: 苏林涛, 江剑峰, 马俊, 黄亮亮, 雷昌宇, 韩尧政, 康辉. O臂导航在椎弓根发育性狭窄胸腰椎骨折中的精准应用[J].

中国组织工程研究, 2025, 29(9):1855-1862.



literature on the application of O-arm navigation-assisted nail placement in thoracolumbar spine fractures with developmental stenosis of the vertebral arch both domestically and abroad.

OBJECTIVE: To explore the accuracy of percutaneous vertebral arch nail placement assisted by O-arm navigation in patients with thoracolumbar spine fractures complicated by developmental stenosis of the vertebral arch.

METHODS: A retrospective analysis was conducted on 53 patients who underwent percutaneous vertebral arch screw fixation surgery at Department of Orthopedics, General Hospital of Central Theater Command of PLA for thoracolumbar spine fractures complicated by developmental stenosis of the vertebral arch from January 2021 to March 2023. Totally 208 cases of vertebral arch developmental stenosis were found (cases with multiple vertebral arch developmental stenosis were counted separately). Based on the surgical approach, the patients were divided into two groups: O-arm navigation group ($n=98$) and C-arm fluoroscopy group ($n=110$). Postoperative imaging data were compared between the two groups, including anatomical perforation score, functional perforation score, actual vs. expected nail trajectory in the horizontal plane, and sagittal plane angle differences.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) There was no significant difference in the narrowest width of the pedicle isthmus (pow) between the two groups of patients ($P > 0.05$). The proportions of different degrees of narrowing (mild: $6 \text{ mm} \leq \text{pow} < 7 \text{ mm}$, moderate: $5 \text{ mm} \leq \text{pow} < 6 \text{ mm}$, severe: $\text{pow} < 5 \text{ mm}$) were also not significantly different between the two groups ($P > 0.05$). (2) The overall grade and scores of anatomical perforation and functional perforation were lower in the O-arm group compared to the C-arm group, and these differences were statistically significant ($P < 0.001$). In terms of the angular deviation between the actual and planned screw trajectories, the O-arm group had smaller deviations, and these differences were statistically significant ($P < 0.05$). (3) In the mild and moderate narrowing groups, the O-arm group showed significant advantages in anatomical perforation, functional perforation, and angular deviation between actual and planned screw trajectories, and these differences were statistically significant ($P < 0.001$). (4) The O-arm group demonstrated better performance in anatomical perforation and functional perforation, especially in the $T_{12}-L_2$ segment, with more significant advantages. Additionally, the O-arm group had better angular deviations in actual and planned screw trajectories in all segments compared to the C-arm group. (5) Therefore, the use of O-arm navigation-assisted percutaneous screw placement for the treatment of thoracolumbar fractures with developmental pedicle isthmal narrowing provides higher accuracy and safer surgery.

Key words: developmental stenosis of vertebral pedicle; O-arm navigation system; pedicle screw; screw placement accuracy; percutaneous screw placement; internal fixation; pedicle rupture; thoracolumbar fractures

Funding: Hubei Province Medical Youth Top Talents Project, No. (2019)48 (to KH); Hubei Provincial Health Commission General Research Project, No. WJ2023M091 (to KH); Wuhan Young and Middle aged Medical Backbone Talent Training Project, No. (2017)51 (to KH)

How to cite this article: SU LT, JIANG JF, MA J, HUANG LL, LEI CY, HAN YZ, KANG H. Precise application of O-arm navigation system in thoracolumbar fractures with developmental pedicle stenosis. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2025;29(9):1855-1862.

0 引言 Introduction

胸腰椎骨折是脊柱损伤中最常见的类型之一^[1]。经皮椎弓根螺钉内固定术因创伤小、住院短、感染风险低、对周围软组织破坏少等诸多优势，被广泛运用于无神经损伤型胸腰椎骨折的治疗^[2-4]。然而传统的经皮置钉方法，主要依赖“C”臂反复的透视，无法直视解剖标志，因而在置钉时可能出现钉道偏移致使椎弓根破裂的情况，严重时甚至导致神经、血管损伤^[5]。同时，置钉不准确也会导致螺钉固定强度下降，术后出现螺钉松动、位置改变甚至脱出，导致手术失败^[6-7]。置钉不准确是临床医生面临的困难，此类问题在椎弓根发育狭窄的患者中尤为突出^[8]，如何在发育狭窄的椎弓根中实现准确置钉亟待解决。近年来，O臂导航系统(The O-arm System)开始应用于临床，能够提供优质的二、三维影像，清晰显示各骨骼的解剖结构，通过仿真手术流程，使得术者能够近乎于“直视下”完成操作，为精准置钉提供了途径^[9-10]。然而O臂导航在发育性狭窄的椎弓根中经皮置钉是否具有优势，国内外缺乏相关研究。因而，此次研究通过对中部战区总医院既往收治的椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折行经皮置钉手术的病历资料进行回顾性研究，评估O臂导航在椎弓根发育性狭窄胸腰椎骨折经皮置钉中的精准性，以期为此类患者的个体化治疗提供参考。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 回顾性病例分析，定量资料样本满足正态分布时用 t 检验，不满足正态分布时用 Mann-Whitney 检验；等级资料用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。

1.2 时间及地点 试验于 2021 年 1 月至 2023 年 3 月在中部战区总医院完成。

1.3 对象

纳入标准: ①年龄 18-60 岁；②骨折节段为 $T_{11}-L_4$ ；③单节段骨折；④双侧椎弓根均完整；⑤椎弓根最窄宽度 (pedicle outer width, pow) $< 7 \text{ mm}$ ^[8]；⑥骨折 AO 分型为 A3、A4 型^[11]；⑦ Tlics 评分 ≥ 4 分。

排除标准: ①既往胸腰椎手术、感染史；②严重骨质疏松；③双侧椎弓根不完整；④伴神经功能损伤；⑤影像资料不全。

共纳入中部战区总医院骨科 2021 年 1 月至 2023 年 3 月行经皮椎弓根螺钉固定术的椎弓根发育性狭窄的胸腰椎骨折患者 53 例，其中出现发育性狭窄的椎弓根共 208 个 (患者可能出现多节段椎弓根发育狭窄、每节段可能出现双侧狭窄情况，因此按照每一个狭窄的椎弓根为一个统计)。按手术方式分为 2 组，O 臂导航组 98 个椎弓根，C 臂透视组 110 个椎弓根。两组术前一般资料相比差异无显著性意义 ($P > 0.05$)，具有可比性。此次研究取得中部战区总医院医学伦理委员会批准 (批号: [2024]037-01)，所有患者均知情同意并自愿参与此次研究。

1.4 材料 O 臂导航系统为第 7 代 O-armTMO2s 术中影像系统 (美敦力公司生产)；C 臂透视采用 C 型臂 X 射线机 (德国西门子公司生产)。Adena 脊柱内固定系统介绍见表 1。

1.5 方法 两组患者分别在 O 臂导航辅助下和 C 臂透视辅助下完成手术操作，两组手术均由同一高年资医师完成。由于所选患者 pow 均小于 7 mm，因此两组患者均统一采用直径为 5.5 mm 型号的经皮椎弓根螺钉，pow 小于椎弓

表 1 | 临床试验应用的骨科植入物介绍

Table 1 | Introduction of orthopedic implants used in clinical trials

指标	Adena 脊柱内固定系统
生产厂家	上海三友医疗器械股份有限公司
批准号	国械注准 20173130719
组成	该产品由椎弓根钉、骨钩、棒、连接杆、角度杆、横连器、螺塞、螺母、角度块、连接座、连接块、连接头组成。
材质	钛合金 (TC4、TC4ELI) 和纯钛 (TA3) 材料
型号	RSS 型
适应证	该产品供脊柱后路内固定用
不良反应	①任一或所有组件出现早期或后期松动; ②任一组件或所有组件部件都出现分离、弯曲及/或断裂 ③由移植材料、碎片及腐蚀性(由裂隙、侵蚀及/或一般腐蚀)产生的异物(过敏)反应, 包括可能形成金属沉积产生的斑点、结出瘢痕、形成肿瘤及/或自体免疫疾病; ④不融合(或假性关节炎); 延迟愈合; ⑤骨吸收或骨密度减小, 可能由应力屏蔽而引起; ⑥由于存在植入物, 可能会干扰 CT 及/或磁共振成像

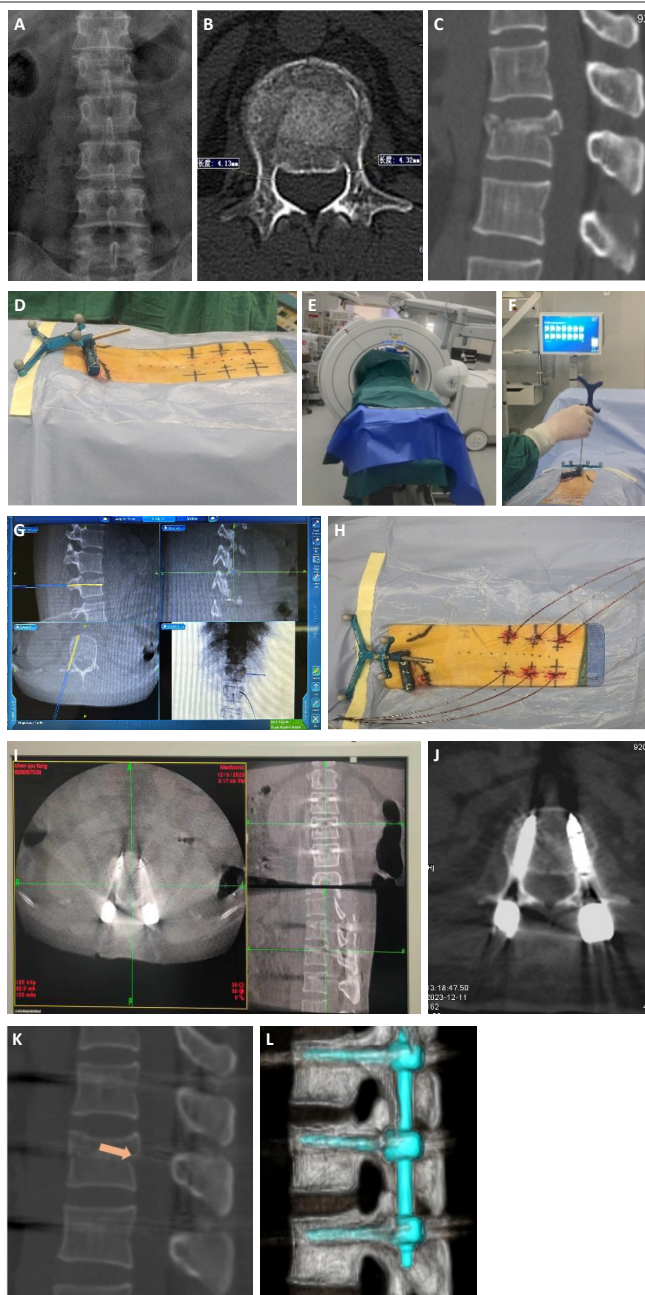
根螺钉直径时, 采用“出-入-出”的手术方案^[12]。

O 臂组: 采用 O-arm 导航系统辅助下经皮置钉。全麻下取俯卧位, 置于脊柱专用手术床上, 腹部悬空, 手法按压复位。“O”臂导航装置及工作站放置于手术台尾侧, 确保术中术者能清楚观察工作站上屏幕图像。术前采用二维模式定位椎体并标记, 连接导航系统并录入信息。参考架固定于一侧髂嵴, 确保无松动, 校对并确认参考架、定位发射信号间无遮挡。行“O”臂三维扫描, 完成图像采集, 自动上传到导航工作站, 工作站自动储存并重建得到三维图像, 注册、校正各无线导航引导装置。沿投影外缘纵行切 1.5 cm 左右, 利用导航工具对指定椎弓根开口、开道。在导航引导下调整头倾、外展的角度, 确定置入钉轨道的方向、角度及深度, 置入导丝。测量预置入椎弓根螺钉的尺寸, 沿导丝攻入空心攻丝再沿导丝置入适宜的空心椎弓根螺钉, 相同方法置入剩余 5 枚螺钉, 将预弯连接棒经皮置入, 撑开器撑开复位后锁定螺钉尾帽。O 臂机再次透视, 待效果满意后折断椎弓根螺钉尾端, 撤出导航设备, 冲洗切开处、逐层缝合, 无菌敷料覆盖, 结束手术。典型病例见图 1。

C 臂组: 采用传统“C”臂辅助下经皮置钉。全麻下取俯卧位, 将腹部悬空, 手法按压复位。在“C”臂机透视下标记伤椎及相邻椎体椎弓根的体表位置投影点, 投影点旁开约 1 cm 为穿刺点。在 C 臂机透视下, 穿刺针经皮逐层进入, 触及上关节突外侧缘与横突中线交点, 通过椎弓根进入椎体直至后壁, 透视确认椎弓根内侧壁完整, 保持穿刺针平行上终板进入椎体约 2 cm; 拔出针芯, 依次置开路、攻丝、测深, 经皮置入 6 枚椎弓根螺钉。折弯连接棒并经皮置入, 撑开器撑开复位后锁定螺钉尾帽。

“C”臂机透视满意, 其余步骤同 O 臂组一致。

1.6 主要观察指标 使用 PACS 系统测量患者术后 CT 图像并记录相关数据, 采用解剖学穿孔分级、功能性穿孔分级、实际钉道方向与预期钉道方向角度差等指标评价置钉准确程度。



图注: 图中为 22 岁女性患者, L₁ 椎体骨折, 椎弓根发育性狭窄, O 臂导航辅助下行经皮椎弓根螺钉内固定术。图 A 为术前腰椎 X 射线正位片; B 为术前 CT 测量 L₁ 椎弓根宽度, 左侧 4.32 mm, 右侧 4.13 mm; C 为术前矢状位 CT, 可见骨折块突入椎管; D 为固定参考架; E 为扫描重建图像; F 为激活导航系统器械; G 为 O 臂导航系统辅助下寻找进针点、准备钉道; H 为导航辅助下导丝放置完成; I 为置钉后扫描验证准确性; J 为术后 CT, 显示椎弓根螺钉位置良好; K 为 CT 矢状面重建, 显示骨折椎体高度恢复、椎管内骨折块复位(箭头所示); L 为术后 CT 三维重建。

图 1 | O 臂导航系统手术典型病例
Figure 1 | Typical cases of O-arm navigation system surgery

1.6.1 解剖学穿孔分级评估^[13-14] 根据椎弓根螺钉位置分为 4 级: 0 级(完美位置), 椎弓根螺钉完全位于椎弓根内, 未穿破骨皮质; 1 级(安全位置), 椎弓根螺钉穿破皮质 < 2 mm; 2 级(潜在危险位置), 螺钉穿破皮质 ≥ 2 mm 且 < 4 mm; 3 级(危险位置), 螺钉穿破皮质 ≥ 4 mm (图 2)。

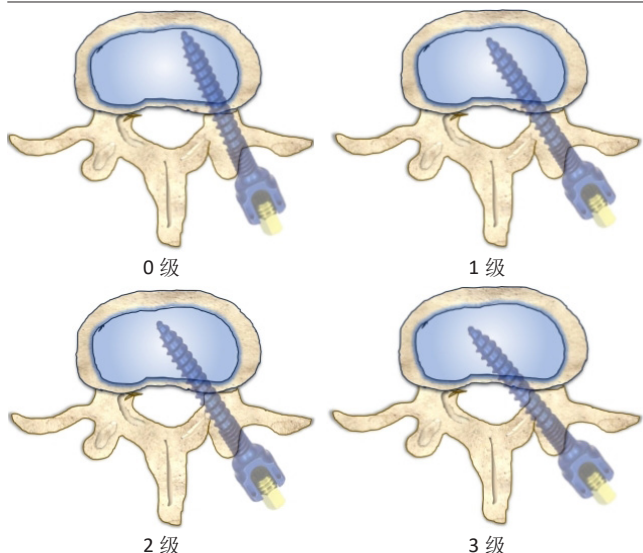


图2 | 椎弓根解剖学穿孔分级
Figure 2 | Grade of anatomical perforation of vertebral pedicle

1.6.2 功能性穿孔分级评估^[15] 0级(绝对安全), 椎弓根螺钉未突破椎弓根; 1级(相对安全), 椎弓根螺钉突破椎弓根的上壁或者外侧壁; 2级(危险位置), 椎弓根螺钉突破椎弓根内侧壁或者下壁(图3)。

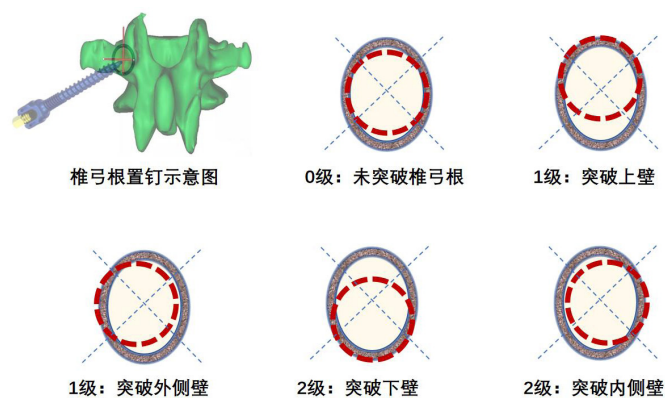


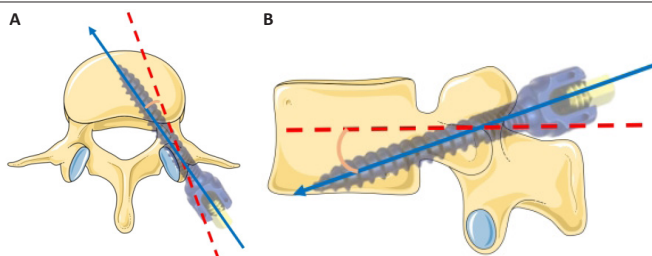
图3 | 椎弓根功能性穿孔分级
Figure 3 | Grade of functional perforation of pedicle

1.6.3 实际钉道方向与预期钉道方向角度差^[16] 水平面角度差为患者CT水平切面实际钉道方向和预期钉道方向所成夹角; 矢状面角度差为患者CT矢状切面实际钉道方向和预期钉道方向所成夹角(图4)。

1.7 统计学分析 采用SPSS 26.0软件进行数据处理, 定量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 样本满足正态分布时用t检验, 不满足正态分布时用Mann-Whitney检验; 等级资料用 χ^2 检验或Fisher精确检验, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。文章统计学方法已经过中部战区总医院骨科生物统计学专家钟炎军老师审核。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 共纳入53例胸腰椎骨折患者, 根据手术方式分为2组, 所有患者均顺利完成手术, 内固



图注: 图A为水平面, B为矢状面, 图中虚线为预期钉道, 实线为实际钉道。
图4 | 实际钉道方向与预期钉道方向角度差示意图
Figure 4 | Schematic diagram of the deviation between the actual and expected nail path directions

定稳定, 无松动、脱落情况。

2.2 试验流程图 见图5。

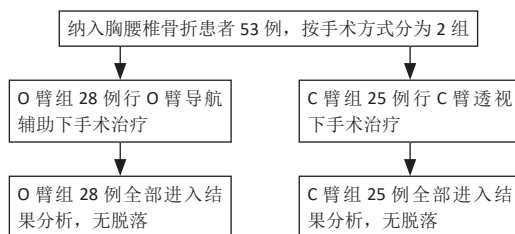


图5 | 两组患者分组流程图
Figure 5 | Flow chart of grouping of patients in two groups

2.3 一般资料比较 两组患者年龄、性别、椎弓根狭窄节段、受伤原因、骨折AO分型等一般资料相比, 差异无显著性意义($P > 0.05$), 见表2。

表2 | 两组患者一般资料比较
Table 2 | Comparison of baseline data between the two groups

指标	O臂组 (n=28)	C臂组 (n=25)	P值
椎弓根狭窄数	98	110	
年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	47.25 \pm 11.64	46.76 \pm 13.79	0.111
男/女 (n)	13/15	10/15	0.637
椎弓根狭窄节段 (椎弓根数)			0.766
T ₁₁	8	8	
T ₁₂	12	20	
L ₁	38	36	
L ₂	28	28	
L ₃	8	12	
L ₄	4	6	
受伤原因 (n)			0.833
高处坠落	9	8	
摔伤	13	10	
车祸伤	4	3	
其他原因	2	4	
AO分型 (n)			0.933
A3型	12	11	
A4型	16	14	
Tlics评分 ($\bar{x} \pm s$, 分)	4.57 \pm 0.74	4.48 \pm 0.65	0.823

2.4 两组患者pow测量结果 两组患者pow并没有明显的差异。此外, 两组患者在不同程度的狭窄分类中(轻度狭窄: $6 \text{ mm} \leq \text{pow} < 7 \text{ mm}$, 中度狭窄: $5 \text{ mm} \leq \text{pow} < 6 \text{ mm}$, 重度狭窄: $\text{pow} < 5 \text{ mm}$)的比例也无显著性差异($P > 0.05$)。见表3。

表 3 | 两组椎弓根最窄宽度 (pow) 测量结果比较

Table 3 | Comparison of measurement results of pedicle width (pow) between the two groups

组别	椎弓根狭窄数	pow ($\bar{x}\pm s$, mm)	pow < 5 mm (n/%)	5 mm ≤ pow < 6 mm (n/%)	6 mm ≤ pow < 7 mm (n/%)
O 臂组	98	5.8±0.1	6/6.1	51/52.0	41/41.8
C 臂组	110	5.9±0.1	9/8.2	53/48.2	48/43.6
P 值				0.388	0.779

2.5 两组患者各项影像测量结果 表 4, 5 结果显示, O 臂组在解剖学穿孔和功能性穿孔上的整体等级及评分低于 C 臂组, 差异有显著性意义 ($P < 0.05$)。在实际钉道与预期钉道夹角差方面, O 臂组实际与预期钉道的角度偏差更小, 差异有显著性意义 ($P < 0.05$)。在轻度及中度狭窄组中, O 臂组在解剖学穿孔、功能性穿孔以及实际钉道与预期钉道夹角差方面表现出明显的优势, 差异有显著性意义 ($P < 0.05$); 在重度狭窄组中, O 臂组与 C 臂组在解剖学穿孔、功能性穿孔以及实际钉道与预期钉道夹角差等方面差异无显著性意义 ($P > 0.05$)。

表 4 | 两组患者的影像指标比较

Table 4 | Comparison of image indexes between the two groups

指标	O 臂组	C 臂组	P 值
解剖学穿孔 (椎弓根数)			
0 级	62	41	0.010
1 级	29	54	
2 级	7	15	
总评分 ($\bar{x}\pm s$)	0.44±0.63	0.76±0.68	0.217
功能性穿孔 (椎弓根数)			
0 级	61	41	< 0.001
1 级	32	27	
2 级	5	42	
总评分 ($\bar{x}\pm s$)	0.43±0.59	1.00±0.87	0.010
实际钉道与预期钉道夹角差 ($\bar{x}\pm s$, °)			
水平面角	2.73±2.00	5.76±2.62	< 0.001
矢状面角	1.97±1.34	4.51±1.81	< 0.001

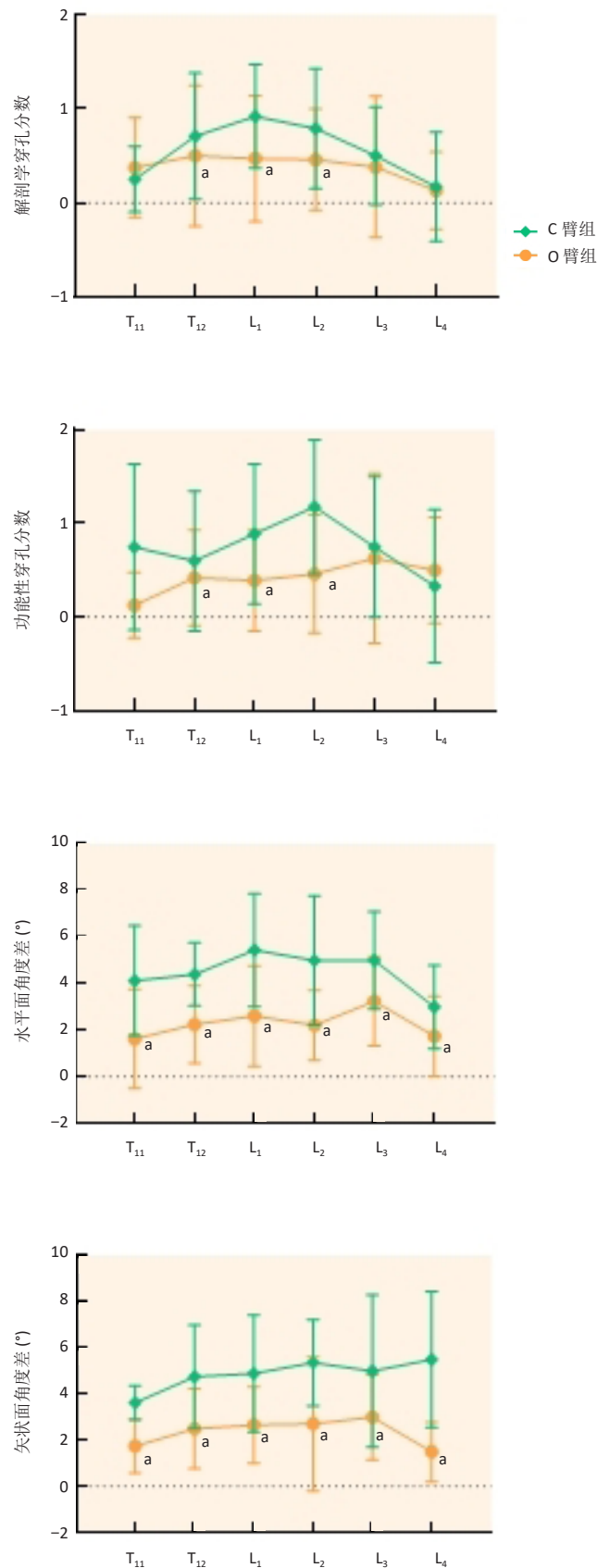
表 5 | 两组患者不同程度椎弓根最窄宽度 (pow) 的影像指标比较

Table 5 | Comparison of image indexes of vertebral pedicle narrowest width (pow) in different degrees between the two groups

组别	解剖学穿孔 (0/1/2, 椎弓根数)	功能性穿孔 (0/1/2, 椎弓根数)	水平面角度差 ($\bar{x}\pm s$, °)	矢状面角度差 ($\bar{x}\pm s$, °)
pow < 5 mm				
O 臂组	0/6/0	0/5/1	3.2±2.6	3.0±0.6
C 臂组	0/7/2	0/5/4	5.6±3.0	5.3±2.9
5 mm ≤ pow < 6 mm				
O 臂组	24/24/3 ^a	25/23/3 ^a	2.6±2.0 ^a	2.9±2.5 ^a
C 臂组	11/33/9	11/29/13	5.2±2.5	4.8±2.3
6 mm ≤ pow < 7 mm				
O 臂组	37/3/1 ^a	37/3/1 ^a	2.0±1.6 ^a	2.1±1.4 ^a
C 臂组	31/15/2	31/8/9	4.4±1.9	5.0±2.3

表注: 与 C 臂组相比, ^a $P < 0.001$ 。

由图 6 可知, O 臂组在解剖学穿孔和功能性穿孔方面整体表现更佳, 尤其在 T₁₂-L₂ 节段, 其优势更加显著。此外, O 臂组在各节段的实际钉道与预期钉道夹角差方面均优于 C 臂组。



图注: 与 C 臂组相比, ^a $P < 0.001$ 。

图 6 | 两组各节段的影像指标比较结果

Figure 6 | Comparison of image indexes of each segment between the two groups

2.6 不良事件 整个随访过程中患者均未出现神经根损伤、硬膜撕裂、血管损伤等情况,也未出现螺钉断裂、脱出及需手术翻修情况及其他相关并发症。

2.7 植入物与宿主的生物相容性 在随访期间,所有患者均未出现内植物周围感染的情况,术后也未出现过敏反应、免疫反应及排斥反应等,术后影像资料显示椎弓根螺钉系统与周围组织实现了良好的结合,患者术后疼痛得到缓解、并未出现明显不适感。

3 讨论 Discussion

因创伤小、恢复快等诸多优势,经皮椎弓根螺钉内固定术广泛用于治疗无神经损伤的胸腰椎骨折^[17-18],但相对于传统开放手术,经皮椎弓根螺钉内固定术只能依赖术中X射线来引导手术,无法直视椎弓根结构,置钉准确性更难保证,尤其是患者椎弓根发育狭窄时^[19]。胸腰段椎弓根冠状切面大致呈椭圆形,其最窄宽度是小于最窄高度的,因此置钉时常测量 pow 作为参考,临床中胸腰段常用的椎弓根螺钉直径 6.0 mm 和 6.5 mm,常用穿刺套管直径 4.0 mm,考虑到椎弓根骨质的延展性和需要足够直径的椎弓根螺钉提供抗剪切强度和稳定性,常选用螺钉直径为椎弓根宽度的 70%-80%^[20],因此国内外文献常以 < 5 mm 和 < 7 mm 作为椎弓根穿刺和置钉临界值^[21]。当胸腰椎椎弓根 pow < 7 mm 时,椎弓根破裂的风险就会增加; pow < 5 mm 时,穿刺难度也会增加,因此可将 pow < 7 mm 时定义为椎弓根狭窄。胸腰段椎弓根的宽度和方向也是变化的,因该区域脊柱结构由胸椎向腰椎过渡^[22-23]。胸椎的椎弓根更趋向于向内倾斜,而腰椎的椎弓根更趋向于向外倾斜,加之骨骼、韧带和关节结构的变化,使得椎弓根在此区域变窄^[24]。pow 在胸段 T₁₁-T₁₂、腰段 L₁-L₅ 都是依次增大的, T₁₂-L₁ 是减小的,其中最窄处位于 L₁ 节段^[8, 25],因此该区域内狭窄椎弓根并不罕见。狭窄椎弓根的头倾角和外展角相较普通椎弓根也有所不同,这使得进针水平面角度需要更小,矢状面角度需要更大,加之椎弓根宽度较窄,使得传统的经皮置钉方式很难满足准确置钉的需求,会增加椎弓根螺钉位置不良的风险,一旦螺钉穿破椎弓根,就可能损伤邻近神经、血管,带来感觉异常、疼痛、运动障碍和缺血性损伤等严重并发症。螺钉置入位置不良还会带来术后骨折、椎弓根断裂、内植物脱出、移位等问题,影响手术效果^[26-27]。

随着 O 臂导航系统辅助置钉应用于脊柱外科,椎弓根置钉准确性得到提高。O 臂导航相较于传统透视,拥有更智能的导航系统,更清晰的三维成像技术、更先进的实时定位和跟踪技术,使得 O 臂导航辅助置钉相较于传统透视准确性更高^[28-30]。然而在狭窄椎弓根这种特殊类型的椎弓根置钉中准确性如何,目前国内外相关研究并不多。

此次研究通过对 2021 年 1 月至 2023 年 3 月中部战区总医院骨科收治的椎弓根狭窄的胸腰椎骨折患者进行回顾性研究,通过分组对比,根据术后影像学资料比较 O 臂导航辅助与 C 臂透视辅助在狭窄椎弓根中置钉的准确率。结果表明:两组患者 pow 并没有明显的差异;两组患者在不同程度的狭窄分组中(轻度狭窄组: 6 mm < pow < 7 mm, 中度狭窄组: 5 mm < pow < 6 mm, 重度狭窄组: pow < 5 mm)的比例也没有显著差异(P > 0.05)。O 臂组在解剖学穿孔和功能性穿孔上的整体等级及评分低于 C 臂组,这表明相较于 C 臂透视, O 臂导航系统能够降低椎弓根穿孔的可能性,减少穿孔时引发严重并发症的风险。在实际钉道与预期钉道夹角差方面, O 臂组实际与预期钉道的角度偏差更小,这表明 O 臂导航系统相较于 C 臂透视,能够减少因椎弓根螺钉方向偏移而带来的相关并发症的可能性。从整体上看, O 臂组在解剖学穿孔和功能性穿孔方面整体表现更佳,尤其在 T₁₂-L₂ 节段,其优势更加显著,这可能是因为 T₁₂-L₂ 节段椎弓根相对更窄,操作难度更大,采用 C 臂透视难以确保椎弓根完整。此外, O 臂组在各节段的实际钉道与预期钉道夹角差方面均优于 C 臂组。从不同狭窄程度的分组来看,在轻度及中度狭窄组中, O 臂组在解剖学穿孔、功能性穿孔以及实际钉道与预期钉道夹角差方面均优于 C 臂组;而在重度狭窄组中, O 臂组与 C 臂组在解剖学穿孔、功能性穿孔以及实际钉道与预期钉道夹角差等方面差异不明显,这可能是由于重度狭窄组样本较少所致。据上述分析可知, O 臂导航辅助相较于传统 C 臂透视在行经皮椎弓根置钉时,能够降低椎弓根的破裂率,即使椎弓根破裂,螺钉突破的方向也相对安全,因此, O 臂导航相较于传统透视,在经皮椎弓根置钉时准确率更高^[31]。

相较以往研究,除了以解剖学穿孔评分来评估置钉的准确性外,此次研究还引入了功能性穿孔和椎弓根螺钉置入实际与预期角度差来评估置钉方向的准确性。因内下侧区域靠近神经根和脊髓以及丰富的血管丛,更加危险,加之内下侧骨质相对薄弱,更易穿破,因此,内下侧的穿孔相比于外上侧更加危险。当椎弓根螺钉突破椎弓根时,术者更希望突破的是相对安全的外侧和上侧,选择置钉方向时也考虑“宁外勿内,宁上勿下”的原则。因而,此次研究引入功能穿孔的概念^[15, 32]。同时,椎弓根螺钉方向偏移损伤终板时,会影响骨折愈合、加速相邻椎间盘的退变。与此同时,椎体周围大血管和重要脏器的存在,椎弓根螺钉偏移突破椎体也会引起严重的后果^[33]。因此,术者希望置钉时螺钉能沿着预期安全的方向置入,以减少术后相关并发症^[34]。此次研究引入椎弓根螺钉实际与预期置钉方向的水平面夹角和矢状面夹角来评估椎弓根螺钉置入方向的准确性。

当椎弓根直径小于螺钉时可采用入-出-入技术^[12] (图7)。在这种技术中,螺钉起于横突上更外侧,螺钉轨迹瞄准内侧,穿过横突,再次穿过椎弓根的外侧壁,进入椎体。虽然导致了外侧突破,但降低了内侧突破的风险,能提供足够的拔出强度和稳定性,且没有明显并发症,因此可适用于椎弓根狭窄的患者^[20, 35]。

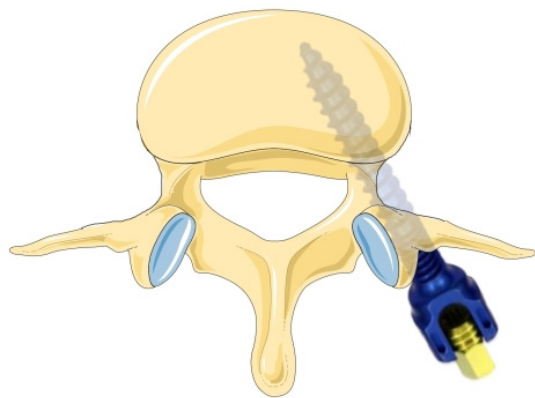


图7 | 入-出-入技术示意图

Figure 7 | Schematic diagram of in-out-in technology

尽管O臂导航系统实现了可视化置钉,然而高昂的价格、较大的空间占有、复杂的维护都是O臂导航系统的缺点,而且如何避免图像漂移一直存在挑战,患者自身呼吸运动、参考架放置位置、设备精度、术中脊柱处于松解状态等都可能是引起图像漂移的原因,为避免导航时产生图像漂移,需要注意^[36-38]:①确保设备和患者的位置稳定,避免晃动引起的位移;②术前手法按压复位,以减小术中各节段相对位置移动;③参考架垂直置入髂嵴以确保深度和稳固;④保持操作轻柔,避免参考架发生位移;⑤术中操作时推挤会引起位移,观察图像时以自然放松状态下为准;⑥骨折椎体距离髂嵴较远时,可考虑将参考架位置固定在相邻节段棘突上;⑦定期更换参考架信号接收球,确保信号传输准确;⑧术中患者或参考架出现位移时,需重新采集图像。

O臂导航辅助相较于传统透视辅助在椎弓根狭窄的胸腰椎骨折患者中行经皮椎弓根螺钉内固定术时具有椎弓根破裂率低、置钉方向更准确、透视次数更少等优势^[39-41],当患者椎弓根狭窄时,可使用O臂导航系统提高置钉的准确性,降低患者术后并发症。

致谢: 感谢恩师康辉副主任医师,研究病例均来自康辉老师的既往手术病例,感谢康辉老师及各位师兄的帮助,感谢中部战区总医院骨科在研究过程中的帮助。

作者贡献: 康辉负责实验设计及手术操作,苏林涛负责资料收集及文章撰写,韩尧政、马俊、黄亮亮、雷昌宇、江剑峰负责文章修改。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 该文章撰写遵守了《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次文字和图表查重,文章经小同行外审专家双盲审稿,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] 徐峰,康辉,魏坦军,等. 椎弓根螺钉不同固定方法治疗胸腰椎骨折的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究,2021,25(9):1313-1317.
- [2] PHAN K, RAO PJ, MOBBS RJ. Percutaneous versus open pedicle screw fixation for treatment of thoracolumbar fractures: Systematic review and meta-analysis of comparative studies. Clin Neurol Neurosurg. 2015;135:85-92.
- [3] CORIC D, ROSSI VJ, PELOZA J, et al. Percutaneous, Navigated Minimally Invasive Posterior Cervical Pedicle Screw Fixation. Int J Spine Surg. 2020;14(3):14-21.
- [4] GAZZERI R. Percutaneous Pedicle Screw Fixation Technique in the Thoracic and Lumbar Spine-Tips and Tricks. Surg Technol Int. 2016; 28(2):303-310.
- [5] LU J, CHEN Y, HU M, et al. Systematic review and meta-analysis of the effect of using percutaneous pedicle screw internal fixation for thoracolumbar fractures. Ann Palliat Med. 2022;11(1):250-259.
- [6] ESSES SI, SACHS BL, DREYZIN V. Complications Associated with the Technique of Pedicle Screw Fixation A Selected Survey of ABS Members. Spine. 1993;18(15):2231-2239.
- [7] MOBBS RJ, SIVABALAN P, LI J. Technique, challenges and indications for percutaneous pedicle screw fixation. J Clin Neurosci. 2011;18(6): 741-749.
- [8] 威力升,谢明忠,李森. 胸腰段脊柱椎弓根形态及相关因素分析[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志,2017,9(3):175-181.
- [9] FENG W, WANG W, CHEN S, et al. O-arm navigation versus C-arm guidance for pedicle screw placement in spine surgery: a systematic review and meta-analysis. Int Orthop. 2020;44(5):919-296.
- [10] DELCONT MR, OU-YANG DC, BURGER EL, et al. Alternative Uses of O-Arm and Stealth Navigation Technology Over 10 Years: The University of Colorado Experience. Orthopedics. 2023;46(2):e89-e97.
- [11] 康辉,徐峰,席金涛,等. 经皮伤椎置入万向椎弓根螺钉治疗胸腰椎骨折[J]. 中国矫形外科杂志,2019,27(20):1831-1835.
- [12] XU P, LIN J, XIAO H, et al. Feasibility of C2 Pedicle Screw Fixation with the "in-out-in" Technique for Patients with Basilar Invagination. Spine. 2023. doi:10.1097/BRS.00000000000004757.
- [13] 凌宸,刘臻,毛赛虎,等. O型臂联合CT三维导航系统辅助颈椎椎弓根螺钉置入的准确性研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2022,32(3): 207-213.
- [14] ORIEF T, ALFAWAREH M, HALAWANI M, et al. Accuracy of percutaneous pedicle screw insertion in spinal fixation of traumatic thoracic and lumbar spine fractures. Surg Neurol Int. 2018;9:78.
- [15] BOON TOW BP, YUE WM, SRIVASTAVA A, et al. Does Navigation Improve Accuracy of Placement of Pedicle Screws in Single-level Lumbar Degenerative Spondylolisthesis: A Comparison Between Free-hand and Three-dimensional O-Arm Navigation Techniques. J Spinal Disord Tech. 2015;28(8):E472-E477.

- [16] VIJAYAN R, DE SILVA T, HAN R, et al. Automatic pedicle screw planning using atlas-based registration of anatomy and reference trajectories. *Phys Med Biol*. 2019;64(16):165020.
- [17] 邹守平, 卢道云, 叶力. 微创经皮伤椎置钉治疗胸腰椎骨折: 6个月随访脊柱生物力学变化 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(24): 3865-3869.
- [18] ZHENG Z, ZHANG L, ZHU Y, et al. Percutaneous cortical bone trajectory screw fixation versus traditional open pedicle screw fixation for type A thoracolumbar fractures without neurological deficit. *J Robot Surg*. 2023; 17(1): 233-241.
- [19] JESWANI S, DRAZIN D, HSIEH JC, et al. Instrumenting the small thoracic pedicle: the role of intraoperative computed tomography image-guided surgery. *Neurosurg Focus*. 2014; 36(3): E6.
- [20] SOLITRO GF, WHITLOCK K, AMIROUCHE F, et al. Currently Adopted Criteria for Pedicle Screw Diameter Selection. *Int J Spine Surg*. 2019; 13(2):132-145.
- [21] 刘旭, 张进. CT及三维重建在胸腰椎骨折患者椎弓根宽度测量研究中的应用 [J]. *实用骨科杂志*, 2019,25(7):607-610.
- [22] POOLMAN AM, WESSELS Q, SCHOOR AV, et al. Thoracolumbar transitional vertebrae: Quantitative differentiation and associated numeric variation in the vertebral column using skeletal remains. *J Anat*. 2023;243(2):311-318.
- [23] PRIYA A, NARAYAN RK, GHOSH SK, et al. Analysing lumbar pedicle morphometry observed via traditional and recent modalities. *J Orthop*. 2023;43:17-24.
- [24] PETRONE B, ALBANO J, STOCKTON R, et al. Demographic Analysis of Pedicle Diameter, and Estimated Pedicle Screw Length of the Lumbar Spine in a Diverse Population. *Int J Spine Surg*. 2021;15(2):259-265.
- [25] MORITA K, OHASHI H, KAWAMURA D, et al. Thoracic and lumbar spine pedicle morphology in Japanese patients. *Surg Radiol Anat*. 2021;43(6): 833-842.
- [26] ZHAO Q, ZHANG H, HAO D, et al. Complications of percutaneous pedicle screw fixation in treating thoracolumbar and lumbar fracture. *Medicine*. 2018;97(29):e11560.
- [27] 曾红生, 陈子华, 陈建威, 等. 经伤椎椎弓根螺钉置入内固定修复胸腰椎骨折: 远期效果及生物力学分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2016,20(4):571-576.
- [28] PERDOMO-PANTOJA A, ISHIDA W, ZYGOURAKIS C, et al. Accuracy of Current Techniques for Placement of Pedicle Screws in the Spine: A Comprehensive Systematic Review and Meta-Analysis of 51,161 Screws. *World Neurosurg*. 2019;126:664-678.
- [29] WANG H, ZHENG B, GU H, et al. O-Arm- and Guide-Device-Assisted Personalized Percutaneous Kyphoplasty for Thoracolumbar Osteoporotic Vertebral Compression Fractures. *J Pers Med*. 2023;13(4):595.
- [30] LU YJ, MIAO YM, ZHU TF, et al. Comparison of the Wiltse Approach and Percutaneous Pedicle Screw Fixation Under O-arm Navigation for the Treatment of Thoracolumbar Fractures. *Orthop Surg*. 2021;13(5): 1618-1627.
- [31] LU J, CHEN W, LIU H, et al. Does Pedicle Screw Fixation Assisted by O-Arm Navigation Perform Better Than Fluoroscopy-guided Technique in Thoracolumbar Fractures in Percutaneous Surgery?: A Retrospective Cohort Study. *Clin Spine Surg*. 2020;33(6):247-253.
- [32] ASAMOTO S, KOJIMA K, WINKING M, et al. Optimized Screw Trajectory for Lumbar Cortical Bone Trajectory Pedicle Screws Based on Clinical Outcome: Evidence Favoring the Buttress Effect Theory. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2018;79(6):464-470.
- [33] LEE KY, KIM MW, SEOK SY, et al. The Relationship between Superior Disc-Endplate Complex Injury and Correction Loss in Young Adult Patients with Thoracolumbar Stable Burst Fracture. *Clin Orthop Surg*. 2017;9(4):465-471.
- [34] MANBACHI A, COBBOLD RS, GINSBERG HJ. Guided pedicle screw insertion: techniques and training. *Spine J*. 2014;14(1): 165-179.
- [35] MATSUKAWA K, YATO Y, IMABAYASHI H. Impact of Screw Diameter and Length on Pedicle Screw Fixation Strength in Osteoporotic Vertebrae: A Finite Element Analysis. *Asian Spine J*. 2021;15(5): 566-574.
- [36] 陆声榆, 沙轲, 陆彩玲, 等. O臂导航在骶髂螺钉置钉中的应用 [J]. *广西医科大学学报*, 2021,38(12):2352-2356.
- [37] ZHAO J, JIANG H, ZHUGE Y, et al. Risk Factors for the Drift Phenomenon in O-arm Navigation-Assisted Pedicle Screw Placement during Spinal Deformity Surgery. *Orthop Surg*. 2023;15(1):118-123.
- [38] MATHEW JE, MOK K, GOULET B. Pedicle violation and Navigational errors in pedicle screw insertion using the intraoperative O-arm: A preliminary report. *Int J Spine Surg*. 2013;7:e88-e94.
- [39] CROCI DM, NGUYEN S, STREITMATTER SW, et al. O-Arm Accuracy and Radiation Exposure in Adult Deformity Surgery. *World Neurosurg*. 2023;171:e440-e446.
- [40] YOKOTA K, KAWANO O, SAKAI H, et al. Intraoperative Radiation Exposure from O-arm-based 3D Navigation in Spine Surgery. *Spine Surg Relat Res*. 2023;7(6):496-503.
- [41] CRAWFORD BD, NCHAKO CM, REBEHN KA, et al. Transpedicular Screw Placement Accuracy Using the O-Arm Versus Freehand Technique at a Single Institution. *Global Spine J*. 2022;12(3):447-451.

(责任编辑: GD, ZN, QY, LJY)