

· 临床论著 ·

# 脊柱侧弯矫正术中三维导航椎弓根钉置入的意义

周纪平, 申霞, 刘彬, 吴瑞, 李佳佳, 杨永军, 丛波\*, 刘永强

(文登整骨医院, 山东威海 264400)

**摘要:** [目的] 探究术中导航系统在脊柱侧弯畸形手术置钉中的临床应用效果。[方法] 回顾性分析本院 2015 年 7 月—2018 年 7 月手术治疗的脊柱侧弯 40 例患者的临床资料, 依据术前医患沟通结果, 21 例采用术中三维即时导航系统辅助置钉(导航组), 19 例采用传统徒手方法置钉(徒手组)。比较两组围手术期、随访及影像资料。[结果] 所有患者均顺利手术, 无严重术中并发症。导航组置钉准确度 [A/B/C/D/E, (221/8/5/0/0) vs (174/19/12/7/0),  $P<0.001$ ]、手术时间 [(43.7±12.2) min vs (65.4±19.7) min,  $P<0.001$ ]、术中出血量 [(623.2±40.5) ml vs (1 024.3±38.3) ml,  $P<0.001$ ]、单钉置入时间 [(2.2±1.3) min vs (5.1±2.4) min,  $P<0.001$ ] 均显著优于徒手组, 但两组间下地行走时间、住院时间差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。40 例患者随访 12~24 个月, 平均 (18.2±4.6) 个月, 随时间推移, 两组患者 VAS 评分及 ODI 均显著下降 ( $P<0.05$ )。相应时间点, 两组间 VAS 及 ODI 评分的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ ); 两组患者均未出现后期畸形加重, 均无翻修手术等并发症。影像方面, 与术前相比, 术后 2 周及末次随访两组的主弯 Cobb 角、后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL 及 SVA 均显著改善 ( $P<0.05$ ); 相应时间点, 两组间上述影像测量指标比较均无明显差异 ( $P>0.05$ )。[结论] 术中即时三维导航系统的应用使脊柱侧弯矫正手术置钉更加准确、快速, 降低了手术风险, 临床效果显著。

**关键词:** 脊柱侧弯, 椎弓根螺钉, 术中即时三维导航系统, 置钉准确性

**中图分类号:** R687      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8478 (2023) 18-1682-06

**Intraoperative three-dimensional navigation used in pedicle screw placement for correction of scoliosis // ZHOU Ji-ping, SHEN Xia, LIU Bin, WU Rui, LI Jia-jia, YANG Yong-jun, CONG Bo, LIU Yong-qiang. Wendeng Orthopedic Hospital, Weihai 264400, China**

**Abstract:** [Objective] To explore the clinical efficiency of the intraoperative navigation system used in pedicle screw placement for correction of scoliosis. [Methods] A retrospective study was conducted on 40 patients who underwent surgical correction with pedicle screw-rod system for scoliosis in our hospital from July 2015 to July 2018. According to the preoperative doctor-patient communication, 21 patients had the pedicle screws placed assisted by intraoperative three-dimensional real-time navigation system (the navigation group), while the remaining 19 patients had screws placed by the traditional freehand technique (the freehand group). The perioperative, follow-up and imaging data of the two groups were compared. [Results] All patients in both groups had corresponding surgical procedures performed smoothly without serious complications. The navigation group proved significantly superior to the freehand group in terms of accuracy of screw placement [A/B/C/D/E, (221/8/5/0/0) vs (174/19/12/7/0),  $P<0.001$ ], operation time [(43.7±12.2) min vs (65.4±19.7) min,  $P<0.001$ ], intraoperative blood loss [(623.2±40.5) ml vs (1024.3±38.3) ml,  $P<0.001$ ], a single screw insertion time [(2.2±1.3) min vs (5.1±2.4) min,  $P<0.001$ ], but there was no significant difference in walking time and hospital stay between the two groups ( $P>0.05$ ). As time went during follow-up period lasted for 12~24 months, with an average of (18.2±4.6) months, both VAS and ODI scores in both groups significantly decreased ( $P<0.05$ ). At any corresponding time points, there were no significant differences in VAS and ODI scores between the two groups ( $P>0.05$ ). There was no complications, such as later deformity aggravation and revision surgery in any patients in both groups. Regarding imaging, the Cobb angle of main curvature, kyphotic Cobb angle, C<sub>7</sub>PL-CSVL and SVA significantly improved in both groups 2 weeks after surgery and at the last follow-up compared with those preoperatively ( $P<0.05$ ), which were not statistically significant between the two groups at any time points accordingly ( $P>0.05$ ). [Conclusion] Application of the intraoperative real-time 3D navigation system makes pedicle screw placement for correction of scoliosis more accurate and rapid, reduces the risk of surgery, and achieve significantly improved clinical efficiency.

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.18.09

作者简介:周纪平,主任医师,研究方向:脊柱外科,(电话)15953885985,(电子信箱)wdgzjp@163.com

\*通信作者:丛波,(电话)17863716999,(电子信箱)1002542388@qq.com

**Key words:** scoliosis, pedicle screws, intraoperative three-dimensional and real-time navigation system, accuracy of pedicle screw placement

特发性脊柱侧弯的病因复杂，发病机制尚不明确，该病好发于青少年<sup>[1]</sup>，随着年龄增加其症状逐渐加重，进而影响身体平衡，严重者影响呼吸、心脏功能，出现神经压迫症状甚至瘫痪<sup>[2-5]</sup>，后路椎弓根螺钉固定矫形术是治疗脊柱侧弯的重要方式，通过椎弓根螺钉的力学稳定性对脊柱进行固定、矫形，但脊柱侧弯患者脊柱多失去正常解剖结构，存在椎体旋转、骨性标志消失、脊髓位置偏移等情况，同时青少年患者椎弓根细小，置钉过程中易造成周围神经血管损伤，甚至突破内侧骨皮质损伤脊髓<sup>[6, 7]</sup>，手术难度大，风险高，即便术者经验丰富仍然无法保证置钉的准确率与安全性<sup>[8]</sup>。术中即时三维导航系统可以自动采集并生成手术区域的三维图像，术者直接在其三维重建图像的辅助下选取置钉点，控制置钉方向和置钉深度，置入椎弓根螺钉<sup>[9]</sup>。这有利于提高手术质量，避免螺钉突破椎弓根内外侧骨皮质，有效减少神经血管损伤概率，为手术的安全提供了可靠保障<sup>[10, 11]</sup>。术中即时三维导航系统应用于脊柱外科，尤其是脊柱侧弯矫正手术，显著降低了细小以及变异椎弓根螺钉置入的困难度和偏差率，降低了手术风险。本研究假设三维导航技术可明显提升手术效率和安全性，对导航辅助与传统徒手技术进行临床比较，现报告如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 纳入与排除标准

纳入标准：(1) 测量站立正位全脊柱 X 线片脊柱 Cobb 角 $\geq 40^\circ$ ；(2) 患者一般情况好，无明显手术禁忌证，可以耐受手术。

排除标准：(1) 患有严重的精神疾病；(2) 患有严重骨质疏松、癌症肿瘤转移、结核未控制等不适宜手术的其他疾病；(3) 合并严重脊髓或神经损伤。

### 1.2 一般资料

回顾 2015 年 7 月—2018 年 7 月本院进行手术矫正的脊柱侧弯患者，共 40 例符合上述标准，纳入本研究。依据术前医患沟通结果，21 例采用导航辅助技术（导航组）19 例采用传统徒手技术（徒手组）。两组术前一般资料见表 1，治疗前两组患者的年龄、性别及病程的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。本研究经医院伦理委员会审批，所有患者术前均签署手术知情同意书。

### 1.3 手术方法

两组患者术前均行手术节段 CT+MPR 重建、MRI 及 DR 检查（图 1a, 1b），全身麻醉后，取俯卧位，常规消毒、铺巾。行后正中切口，显露预计手术段棘突、双侧椎板及横突。

导航组：将追踪器安放于需要固定椎体的上一椎体棘突，安置 C 形臂 X 线机，并连接导航系统和 C 形臂 X 线机系统，将术中即时三维导航系统相关的手术器械通过红外导航进行校准、认证（图 1c）。手动移动 C 形臂 X 线机至扫描结束位置，然后移动到扫描开始位置，踩住脚踏开关开始三维扫描。C 形臂 X 线机自动采集并重建三维图像。观察椎弓根三维图像的冠状面、矢状面及横断面（图 1d, 1e），在术中即时三维重建图像引导，确定置钉位置。按影像引导的置钉方向及置钉深度，分别拧入各枚椎弓螺钉（图 1f），C 形臂 X 线机正侧位透视确定螺钉位置良好。选择合适双侧棒，并进行预弯。将棒置入各枚椎弓钉尾槽，通过旋棒、撑开和加压技术矫正脊柱畸形。再次透视确定畸形矫正满意、内固定物位置良好后，旋紧固定钉-棒系统，安装横连加固。常规止血、冲洗，放置乳胶引流管 1 根，紧密缝合关闭切口，无菌敷料包扎。

徒手组：显露置钉点，用开路锥突破椎弓根的外侧皮质骨，然后用椎弓根探子经椎弓根内进入椎体，探球触探椎弓根前壁、内外侧壁完好，完成椎弓根置钉，再次行 C 形臂 X 线机正侧位透视确定螺钉位置良好。后续手术操作同上。

术后 48 h 拔除引流管，给予脱水消肿药物治疗。定期复查 CT、DR，评估椎弓根螺钉位置和矫形固定情况，并根据复查情况逐渐佩戴支具适当地地活动，进行康复锻炼。

### 1.4 评价指标

记录围手术期资料，包括置钉所致并发症如神经根、血管、脊髓损伤等不良事件，记录手术时间、术中出血量、单钉置入时间、下地行走时间及住院时间。采用疼痛视觉模拟评分（visual analogue scale, VAS）、Oswestry 功能障碍指数（Oswestry disability index, ODI）评估临床效果。行影像检查，根据 Gertzbein-Robbins 标准<sup>[12]</sup>，CT 定量分析椎弓根螺钉位置，A 级为椎弓钉完全位于椎弓根内，未破坏椎弓根皮质；B 级为椎弓钉超过皮质 2 mm；C 级为超过皮

质 2~4 mm; D 级为超过皮质 4~6 mm; E 级为超过椎弓根皮质 6 mm 或位于椎弓根外侧。A、B 级属于准确置钉。测量主弯 Cobb 角、后凸 Cobb 角、冠状面偏移 (C<sub>7</sub> plumb line-center sacral vertical line, C<sub>7</sub>PL-CSVL) 和矢状面偏移 (sagittal vertical axis, SVA)。

### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示, 资料呈正态分布时, 两组间比较采用独立样本 *t* 检验; 组内两时间点比较采用单因素方差分析; 资料呈非正态分布时, 采用秩和检验。计数资料采用  $\chi^2$  检验或 Fisher 精确检验。等级资料采用 Mann-whitney *U* 检验。P<0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 围手术期情况

两组患者手术均顺利完成, 无死亡、大出血等严重并发症, 围手术期资料见表 1。导航组 21 例, 共置入 234 枚椎弓根螺钉, A 级 221 枚, B 级 8 枚, C 级 5 枚, 置钉准确率为 97.9% (229/234), 无神经损伤患者。徒手组 19 例, 共置入 212 枚椎弓根螺钉, A 级 174 枚, B 级 19 枚, C 级 12 枚, D 级 7 枚, 置钉准确率为 82.1% (174/212); 其中 3 例 D 级患者因术后出现神经症状, 再次手术调整钉道, 给予脱水消肿、营养神经药物治疗 2 周后, 症状完全缓解, 无严重不良后果。导航组置钉准确率明显优于徒手组 (P<0.05)。

表 1 两组患者围手术期资料与比较

Table 1 Comparison of perioperative documents between the two groups			
指标	导航组 (n=21)	徒手组 (n=19)	P 值
置钉准确度 (例, A/B/C/D/E)	221/8/5/0/0	174/19/12/7/0	<0.001
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$ )	43.7±12.2	65.4±19.7	<0.001
术中出血量 (ml, $\bar{x} \pm s$ )	623.2±40.5	1 024.3±38.3	<0.001
单钉置入时间 (min, $\bar{x} \pm s$ )	2.2±1.3	5.1±2.4	<0.001
下地行走时间 (d, $\bar{x} \pm s$ )	22.5±1.3	22.1±1.2	0.301
住院时间 (d, $\bar{x} \pm s$ )	14.1±1.1	14.0±1.3	0.212

此外, 导航组在手术时间、术中出血量及单钉置入时间均显著优于徒手组 (P<0.05), 两组患者住院时间及下地行走时间差异无统计学意义 (P>0.05)。

### 2.2 随访结果

40 例患者均获 12~24 个月的随访, 平均随访时

间 (18.2±4.6) 个月。两组患者随访资料见表 2, 随时间推移, 两组患者 VAS 评分及 ODI 均显著下降 (P<0.05)。相应时间点, 两组间 VAS 及 ODI 评分的差异均无统计学意义 (P>0.05); 两组患者均未出现后期畸形加重, 均无翻修手术等并发症。

表 2 两组患者随访资料 ( $\bar{x} \pm s$ ) 与比较

Table 2 Comparison of follow-up documents between the two groups			
指标	导航组 (n=21)	徒手组 (n=19)	P 值
VAS 评分 (分)			
术前	7.4±1.9	7.5±1.8	0.244
术后 2 周	3.2±1.1	3.1±1.1	0.163
末次随访	1.2±0.4	1.3±0.4	0.227
P 值	<0.001	<0.001	
ODI 指数 (%)			
术前	72.5±2.2	71.7±2.4	0.237
术后 2 周	21.4±2.4	22.0±2.2	0.158
末次随访	12.3±1.1	11.8±1.0	0.104
P 值	<0.001	<0.001	

### 2.3 影像评估

两组患者影像评估结果见表 3。与术前相比, 术后 2 周及末次随访两组的主弯 Cobb 角、后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL 及 SVA 均显著改善 (P<0.05); 相应时间点, 两组间上述影像测量指标比较均无明显差异 (P>0.05)。术后导航组典型影像见图 1g, 1h。末次随访评估内固定情况位置良好, 无断钉现象。

## 3 讨论

临床中, 脊柱侧弯进行性发展或 Cobb 角≥40°的患者, 往往需要通过后路椎弓根螺钉固定矫形术进行治疗, 而脊柱侧弯的患者其椎体、椎弓根及椎板多存在异常, 病变椎体发生较大变异, 原有的解剖学标志消失<sup>[13]</sup>。后路椎弓根螺钉固定矫形术需要通过置入椎弓根螺钉来进行固定、矫形, 传统的徒手置钉难度大、风险高, 手术部位毗邻重要神经血管, 易造成周围神经血管甚至脊髓损伤, 十分依赖术者的临床经验, 而且传统徒手置钉准确率低, 容易发生椎弓根螺钉位置不良事件, 从而导致固定强度降低, 不能保障脊柱的长期稳定性, 影响手术疗效<sup>[14-17]</sup>。随着数字医学技术的发展, 术中即时三维导航系统的出现在一定程度上提高了脊柱手术中椎弓根螺钉置入的准确率, 为手术的安全性提供了保障。通过术中即时三维



导航系统对手术区域进行扫描，生成手术区域的三维图像，术者可以实时观察椎弓根三维图像的冠状面、矢状面及横断面，在术中即时三维重建图像引导下选取准确的置钉位置，直接在三维重建图像的引导下置入椎弓根螺钉。这有利于术者全面直观地对发生旋转或变异的椎体进行置钉，减少手术时间和术中出血

量，降低手术风险，提高手术质量。李佳佳等<sup>[18]</sup>研究发现，通过术中即时三维导航系统置钉，在术中出血量、置钉时间以及置钉优良率等方面均优于传统徒手置钉；黄彦等<sup>[19]</sup>通过术中即时三维导航系统引导下置钉 236 枚，A 级 227 枚，B 级 7 枚，安全置钉率 99.2%，术后均未发生脊髓和神经损伤。

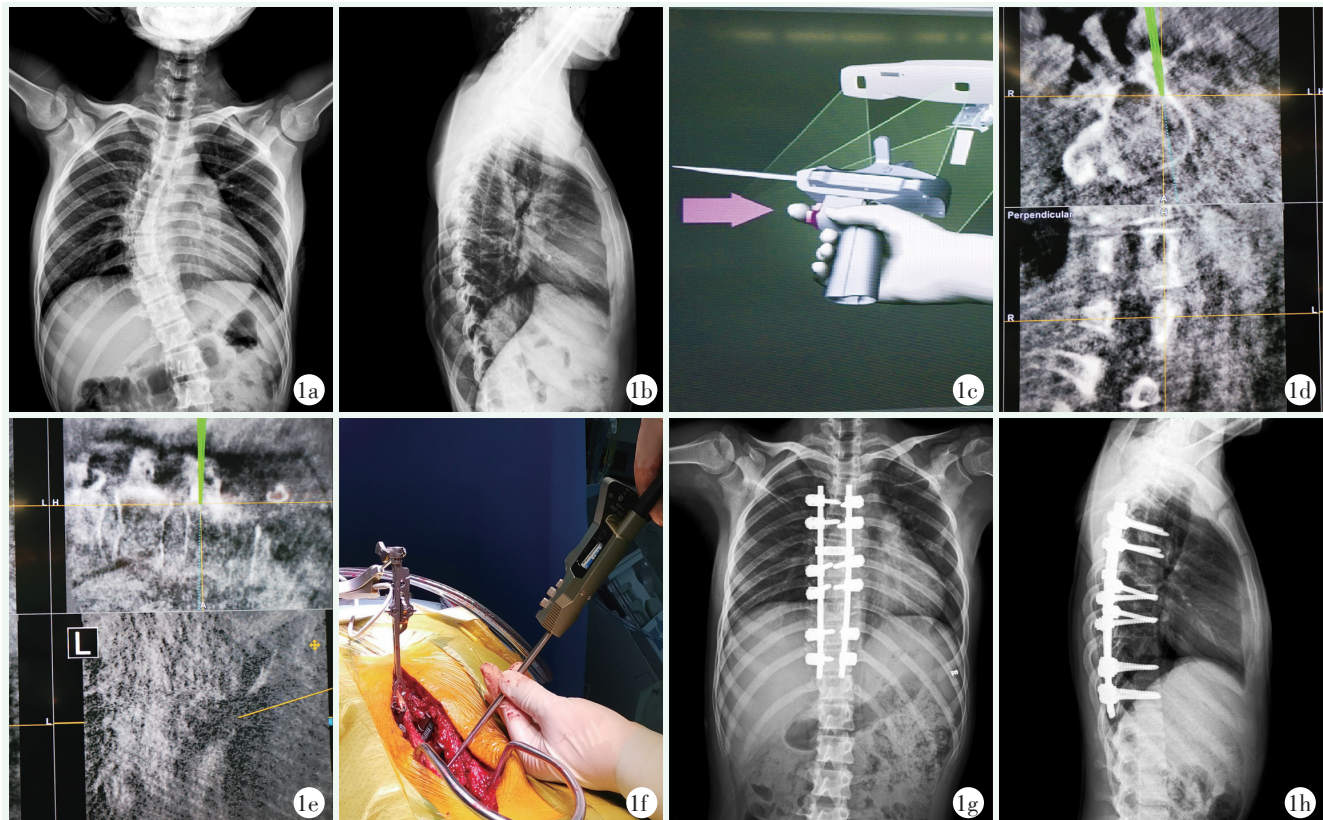


图 1 患者，女，13 岁，特发性脊柱侧弯，后路钉-棒系统矫形固定。1a: 术前正位 X 线片示主弯 Cobb 角 49°，C<sub>7</sub>PL-CSVL 26.4 mm；1b: 术前侧位 X 线片示后凸 Cobb 角 34°，SVA 为 17.2 mm；1c: 红外导航校准手术器械；1d: 术中即时三维导航系统重建进钉点横断面；1e: 术中即时三维导航系统重建进钉点矢状面；1f: 术中即时三维导航引导下置钉；1g: 术后正位 X 线片示主弯 Cobb 角 19°，C<sub>7</sub>PL-CSVL 为 14.4 mm；1h: 术后侧位 X 线片示后凸 Cobb 角 21°，SVA 为 10.2 mm。

Figure 1. A 13-year-old female underwent instrumented correction by pedicle screw-rod system for idiopathic scoliosis. 1a: Preoperative coronal X-ray showed main curvature Cobb angle of 49°, and C<sub>7</sub>PL-CSVL of 26.4 mm. 1b: Preoperative lateral X-ray demonstrated kyphotic Cobb angle of 34°, and SVA of 17.2 mm. 1c: The infrared navigation calibration of surgical instruments. 1d: Intraoperative real-time three-dimensional navigation system reconstruction of the cross-sectional area revealed the insertion point and screw path. 1e: Intraoperative real-time three-dimensional navigation system reconstruction presented the insertion point and screw path on the sagittal plane. 1f: Intraoperative screw placement under real-time three-dimensional navigation guidance. 1g: Postoperative posteroanterior X-ray film showed the remaining main curvature Cobb angle of 19° and C<sub>7</sub>PL-CSVL of 14.4 mm. 1h: Postoperative lateral X-ray presented the kyphotic Cobb angle of 21° and SVA of 10.2 mm.

本研究中，运用术中即时三维导航系统辅助置钉的患者单钉置入时间、手术时间均相对较少，术中即时三位导航系统引导下置钉简化了手术操作，在保证安全与准确的情况下减少了手术时间，从而降低了术中出血量，减少了手术创伤及相关的术后并发症；导航组和徒手组的置钉准确率分别为 97.9%、82.1%

( $P < 0.05$ )，术中即时三维导航系统引导下置钉更加直观，术者可直接根据手术区域的三维图像把握螺钉的矢状位、冠状位及横断面位置，避免螺钉突破椎弓根内外侧骨皮质，同时良好的置钉位置降低了后期螺钉拔出的风险，更有利于脊柱侧弯的矫正、固定。而两组的下地行走时间、住院时间及末次随访时 VAS 评

分、ODI 指数、主弯 Cobb 角、后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL 及 SVA 无显著差异，说明术中即时三维导航系

统对矫形效果的影响很小。

表 3 两组患者影像评估结果 ( $\bar{x} \pm s$ ) 与比较

Table 3 Comparison of imaging documents between the two groups ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	时间点	导航组 (n=21)	徒手组 (n=19)	P 值
主弯 Cobb 角 (°)	术前	48.2±2.5	49.2±2.4	0.165
	术后 2 周	20.2±2.1	19.9±2.1	0.077
	末次随访	19.9±2.1	19.5±2.0	0.094
	P 值	<0.001	<0.001	
后凸 Cobb 角 (°)	术前	38.4±4.2	38.3±4.1	0.201
	术后 2 周	20.2±3.5	20.1±3.3	0.089
	末次随访	20.1±3.1	19.9±3.1	0.072
	P 值	<0.001	<0.001	
C <sub>7</sub> PL-CSVL (mm)	术前	25.2±1.1	25.3±1.1	0.848
	术后 2 周	14.3±1.2	14.7±1.1	0.468
	末次随访	14.0±1.6	14.6±1.0	0.345
	P 值	<0.001	<0.001	
SVA (mm)	术前	17.6±1.3	17.3±1.0	0.587
	术后 2 周	10.2±1.6	10.6±1.5	0.574
	末次随访	10.0±2.0	10.5±1.6	0.543
	P 值	<0.001	<0.001	

综上所述，术中即时三维导航系统在脊柱侧弯矫形手术中的应用优势明显，通过术中即时三维导航系统可以实时掌握置钉情况，极大降低了脊柱侧弯矫形手术中置钉的偏差率和脊髓、神经血管损伤的概率。术中即时三维导航技术仍在不断地发展完善，关于导航系统坐标漂移误差方面还有待进一步的改进<sup>[20]</sup>，但是不可否认术中即时三维导航系统在脊柱侧弯矫形领域具有显著临床效果和巨大发展潜力，值得广泛推广。

参考文献

[1] Peng Y, Wang SR, Qiu GX, et al. Research progress on the etiology and pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis [J]. Chin Med J (Engl), 2020, 133 (4): 483-493. DOI: 10.1097/CM9.0000000000000652.

[2] 张宏其, 周振海, 王龙杰, 等. 一期后路矫形治疗脊柱侧弯合并无症状脊髓栓系患者的临床研究 [J]. 中国矫形外科杂志, 2017, 25 (3): 193-198. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2017.03.01.

Zhang HQ, Zhou ZH, Wang LJ, et al. Clinical study of one-stage posterior correction for scoliosis patients with asymptomatic tethered spinal cord [J]. Orthop J Chin, 2017, 25 (3): 193-198. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2017.03.01.

[3] 黄紫房, 杨军林, 林翔, 等. 青少年特发性脊柱侧弯凸凹侧旋棒矫形与凹侧旋棒矫形的手术效果评估 [J]. 中国矫形外科杂志, 2012, 20 (4): 2246-2249. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.24.09.

Huang ZF, Yang JL, Lin X, et al. Evaluation of surgical effects of convex and concave rotary rod correction for adolescent idiopathic scoliosis [J]. Orthop J Chin, 2012, 20 (4): 2246-2249. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.24.09.

[4] 张强. 脊柱侧弯的微创手术治疗进展 [J]. 中国矫形外科杂志, 2010, 18 (17): 1440-1442.

Zhang Q. Progress of minimally invasive treatment of scoliosis [J]. Orthop J Chin, 2010, 18 (17): 1440-1442.

[5] 陈小明, 张宏其. 特发性脊柱侧弯手术治疗对肺功能影响的研究进展 [J]. 中国矫形外科杂志, 2008, 16 (19): 1483-1483.

Chen XM, Zhang HQ. Research progress on the impact of surgical treatment on lung function in idiopathic scoliosis [J]. Orthop J Chin, 2008, 16 (19): 1483-1483.

[6] 刘伟, 杨操, 杨述华, 等. 术中三维影像脊柱导航引导半椎体切除及椎弓根螺钉置入矫治儿童先天性脊柱侧后凸畸形 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2015, 25 (8): 705-710. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.08.07.

Liu W, Yang C, Yang SH, et al. Intraoperative three-dimensional imaging guided hemivertebral resection and pedicle screw placement for the correction of congenital scoliosis in children [J]. Chin J Spine Spinal Cord, 2015, 25 (8): 705-710. DOI: 10.3969/j.

- issn.1004-406X.2015.08.07.
- [7] Takao M, Nishii T, Sakai T, et al. Application of a CT-3D fluoroscopy matching navigation system to the pelvic and femoral regions [J]. *Comput Aided Surg*, 2012, 17 (2) : 69-76. DOI: 10.3109/10929088.2012.654823.
- [8] González-Vargas PM, Calero Félix L, Martín-Gallego Á, et al. Evaluation of the implantation of transpedicular screws in spinal instrumentation with free-hand technique and navigation-assisted with intraoperative computed tomography: An analytical-positional study [J]. *Neurocirugía (Astur: Engl Ed)*, 2022, 33 (2) : 71-81. DOI: 10.1016/j.neucie.2021.01.002.
- [9] 郎昭, 田伟, 袁强, 等. 术中即时三维导航引导经皮微创椎弓根螺钉内固定治疗颈椎骨折的临床研究 [J]. *中华外科杂志*, 2015, 53 (10) : 752-756. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2015.10.009.
- Lang Z, Tian W, Yuan Q, et al. Clinical study on intraoperative real-time three-dimensional navigation guided percutaneous minimally invasive pedicle screw fixation for cervical spine fractures [J]. *Chin J Surg*, 2015, 53 (10) : 752-756. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2015.10.009.
- [10] 田伟, 韩骁, 何达, 等. 导航辅助微创手术与传统开放手术治疗胸腰段脊柱骨折的对照研究 [J]. *中华外科杂志*, 2011, 49 (12) : 1061-1066. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2011.12.002.
- Tian W, Han X, He D, et al. Comparative study of navigation assisted Minimally invasive procedure and traditional open surgery for thoracolumbar spinal fractures [J]. *Chin J Surg*, 2011, 49 (12) : 1061-1066. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2011.12.002.
- [11] Otomo N, Funao H, Yamanouchi K, et al. Computed tomography-based navigation system in current spine surgery: a narrative review [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58 (2) : 241. DOI: 10.3390/medicina58020241.
- [12] Goz V, Weinreb JH, McCarthy I, et al. Perioperative complications and mortality after spinal fusions: analysis of trends and risk factors [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38 (22) : 1970-1976. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182a62527.
- [13] 曲哲, 钱邦平, 邱勇, 等. O 型臂 3D 导航与徒手置钉在上颈椎椎弓根螺钉置入中的精确性比较 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2015, 25 (12) : 1063-1068. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.12.02.
- Qu Z, Qian BP, Qiu Y, et al. Comparison of accuracy between O-arm 3D navigation and unarmed screw placement in the placement of upper cervical pedicle screws [J]. *Chin J Spine Spinal Cord*, 2015, 25 (12) : 1063-1068. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.12.02.
- [14] Hicks JM, Singla A, Shen FH, et al. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35 (11) : E465-470. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181d1021a.
- [15] 吴宏斌, 郑启新, 杨述华, 等. 术前 CT 测量椎体变异对特发性脊柱侧弯矫形手术的意义 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2009, 17 (1) : 68-70.
- Wu HB, Zheng X, Yang SH, et al. The significance of preoperative CT measurement of vertebral body variation in corrective surgery for idiopathic scoliosis [J]. *Orthop J Chin*, 2009, 17 (1) : 68-70.
- [16] Abe Y, Ito M, Abumi K, et al. A novel cost-effective computer-assisted imaging technology for accurate placement of thoracic pedicle screws [J]. *J Neurosurg Spine*, 2011, 15 (5) : 479-485. DOI: 10.3171/2011.6.SPINE10721.
- [17] Tian W, Weng C, Liu B, et al. Posterior fixation and fusion of unstable Hangman's fracture by using intraoperative three-dimensional fluoroscopy-based navigation [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21 (5) : 863-871. DOI: 10.1007/s00586-011-2085-y.
- [18] 李佳佳, 刘彬, 吴瑞, 等. 术中即时三维导航系统在脊柱畸形矫形手术中的应用 [J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2020, 28 (5) : 18-22.
- Li JJ, Liu B, Wu R, et al. Application of intraoperative real-time three-dimensional navigation system in spinal deformity correction surgery [J]. *Chin J Trad Chin Orthop Traumatol*, 2020, 28 (5) : 18-22.
- [19] 黄彦, 吕浩然, 杨进顺, 等. 术中三维导航引导下脊柱侧凸的椎弓根螺钉置入研究 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2012, 20 (24) : 2228-2231. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.24.05.
- Huang Y, Lv HR, Yang JS, et al. Study on pedicle screw placement for intraoperative three-dimensional navigation guided scoliosis [J]. *Orthop J Chin*, 2012, 20 (24) : 2228-2231. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.24.05.
- [20] 肖德明. 计算机辅助骨科导航技术面临的主要问题 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2005, 7 (7) : 617-619. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2005.07.006.
- Xiao DM. The main problems faced by computer-aided orthopedic navigation technology [J]. *Chin J Orthop Trauma*, 2005, 7 (7) : 617-619. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2005.07.006.

(收稿:2023-05-31 修回:2023-08-06)  
(同行评议专家: 段修武, 李旷, 高加智)  
(本文编辑: 郭秀婷)