

· 论著 ·



全文二维码

导航引导下横突轨迹技术在青少年特发性脊柱侧凸顶椎区置钉中的应用

马昂然¹ 文王强¹ 李国军¹ 何贤波¹ 汤三泉¹ 王文博¹ 林有才² 林素羽²
潘松利¹ 陈焕雄¹

¹ 海南医科大学第一附属医院脊柱外科,海口 570100; ² 海南医科大学第一附属医院麻醉手术科,海口 570100

通信作者:陈焕雄,Email:chenhuanxiong86@163.com

【摘要】 目的 比较在青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)手术中,采用徒手技术(free hand technique, FH)结合横突轨迹技术(transverse process trajectory technique, TPT)和术中导航技术(intraoperative navigation technology, INT)结合 TPT 技术,在顶椎区置入椎弓根螺钉时偏出程度及方向上的差异,探讨 AIS 患者顶椎区椎弓根解剖形态以及 TPT 技术、计算机导航辅助技术在 AIS 手术中的应用效果,分析计算机导航辅助技术与 TPT 技术相结合的临床应用价值。 **方法** 回顾性分析 2021 年 8 月至 2023 年 12 月于海南医科大学第一附属医院接受后路脊柱侧凸矫形内固定手术的 33 例 AIS 患儿临床资料,其中采用 FH 结合 TPT 技术 16 例,为 FH 组;采用 INT 结合 TPT 技术 17 例,为 INT 组。收集两组患儿性别、年龄、Risser 征等基本资料及影像学检查数据,利用手术后 CT 扫描及三维重建技术,记录椎弓根螺钉穿透骨皮质的具体位置,并精确测量穿透部分的长度。 **结果** 两组患儿性别、年龄、Risser 征等比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。INT 组的主弯矫形率为(88.82 ± 1.97)%,优于 FH 组的(85.36 ± 3.16)%;顶椎区置钉时间为(2.65 ± 1.28)min,较 FH 组的(4.24 ± 2.10)min 缩短;以上差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。FH 组顶椎区共置入椎弓根螺钉 113 枚,INT 组 156 枚;FH 组可接受椎弓根螺钉数为 90 枚(占总数的 79.7%),少于 INT 组的 139 枚(占总数的 89.1%)。两组 0 级钉比较,差异有统计学意义($P < 0.05$),主要在凸侧;1 级钉凹、凸侧差异均有统计学意义($P < 0.05$);2 级钉差异无统计学意义($P > 0.05$);3 级钉仅在两组凹侧差异有统计学意义($P < 0.05$)。在 INT 组中,穿透椎弓根内、外侧皮质的数量占该组置钉总数的 8.3% 和 7.05%,低于 FH 组的 19.5% 和 21.2%,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。两组均无一例出现严重并发症。 **结论** 与 FH 结合 TPT 技术相比,INT 结合 TPT 技术能够实时监测和有效提升整体椎弓根螺钉置入的精确度,降低椎弓根内、外侧骨皮质穿透发生率,是一种提高 AIS 矫形内固定手术精确性的可靠方法。

【关键词】 青少年特发性脊柱侧凸; 矫形外科手术; 术中导航技术; 横突轨迹技术; 治疗结果; 置钉精确性; 椎弓根螺钉

基金项目: 国家自然科学基金(82160435, 81902270)

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202408041-008

Navigation-guided transverse process trajectory technique for pedicle screw placing at apical vertebral region in adolescent idiopathic scoliosis

Ma Angran¹, Wen Wangqiang¹, Li Guojun¹, He Xianbo¹, Tang Sanquan¹, Wang Wenbo¹, Lin Youcai², Lin Suyu², Pan Songli¹, Chen Huanxiong¹

¹ Department of Spinal Surgery, First Affiliated Hospital, Hainan Medical University, Haikou 570100, China; ² Department of Anesthesiology & Operating Room, First Affiliated Hospital, Hainan Medical University, Haikou 570100, China

Corresponding author: Chen Huanxiong, Email: chenhuanxiong86@163.com

【Abstract】 Objective To compare the deviation degree and direction of pedicle screw placement in apex region during corrective surgery for adolescent idiopathic scoliosis (AIS) using free hand (FH) plus transverse process trajectory (TPT) versus intraoperative navigation technology (INT) plus TPT. Additionally, the study

explored anatomical morphology of pedicles in apex region of AIS children, application of TPT, clinical application value of computer-assisted navigation technology and combination of intraoperative navigation with TPT in selecting screw insertion points, as well as clinical application value of INT technology during AIS surgery.

Methods A retrospective analysis was conducted for 33 AIS children undergoing posterior spinal deformity correction plus internal fixation from 2021 to 2023. Sixteen children undergoing operations with free hand (FH) plus transverse process trajectory (TPT) were selected as FH group. And another 17 children undergoing operations with intraoperative navigation technology (INT) plus TPT were designated as INT group. Basic profiles and radiographic findings of both groups were collected. The positions of pedicle screw penetration through cortical bone were documented with postoperative computed tomography (CT) and three-dimensional reconstruction techniques. And the distances of penetration were measured. **Results** In terms of gender, age and Risser sign, no statistically significant inter-group differences existed. However, in terms of treatment outcomes, main curve correction rate was $(88.82 \pm 1.97)\%$ in INT group. It was superior to $(85.36 \pm 3.16)\%$ in FH group and this difference was statistically significant ($P < 0.05$). Average time for pedicle screw placement in apex vertebral region was (2.65 ± 1.28) min in INT group and it was shorter than (4.24 ± 2.10) min in FH group. And the difference was also statistically significant ($P < 0.05$). A total of 113 pedicle screws were placed in apex vertebral region in FH group while 156 screws in INT group. FH group had an acceptable number of pedicle screws at 90°, accounting for 79.7% of total. It was less than 139 screws in INT group, accounting for 89.1% of total. Statistically significant inter-group difference existed in the number of grade 0 screws at mostly convex side. Inter-group differences existed in grade 1 screws at both concave and convex sides ($P < 0.05$). No statistically significant difference existed in grade 2 screws and statistically significant inter-group differences in grade 3 screws only at concave side ($P < 0.05$). INT group had lower rates of penetration through medial and lateral walls of pedicle than FH group. In INT group, the number of screws penetrating medial and lateral cortices accounted for 8.3% and 7.05% of total screws in INT group. It was lower than 19.5% and 21.2% in FH group. Statistically significant inter-group difference existed ($P < 0.05$). No serious complications occurred in neither groups. **Conclusions** As compared with FH plus TPT, INT plus TPT enables real-time monitoring, effectively enhances the accuracy of overall pedicle screw placement and lowers the rate of penetration through medial and lateral cortices of pedicle. It proves to be a reliable method of improving the precision of AIS during corrective internal fixation.

【Key words】 Adolescent Idiopathic Scoliosis; Orthopedic Procedures; Intraoperative Navigation Technology; Transverse Process Trajectory Technique; Treatment Outcome; Screw Placement Accuracy; Pedicle Screw

Fund program: National Natural Science Foundation of China (82160435 & 81902270)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202408041-008

青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是一种早期发病且具有长期影响的脊柱三维畸形疾病, 其确切病因至今尚未完全阐明, 是医学界研究的热点^[1]。文献报道全球范围内患病率为 1%~3%^[2]。对于病情较轻的患者, 支具治疗是首选方法, 可以减缓脊柱侧凸进展; 对于 Cobb 角大于或等于 45° 的重度患者, 通常需要手术治疗^[3]。重度脊柱侧凸患者顶椎区椎体和椎弓根极度旋转, 特别是凹侧椎弓根可能发育不良, 变得细长且相对更薄, 这些特点显著增加了顶椎区椎弓根螺钉置入的挑战性^[4-5]。Suk 等^[6]强调, 术中椎弓根螺钉的成功置入对于脊柱侧凸的矫形至关重要, 在顶椎区椎弓根螺钉置入时, 必须注意保护凹侧的脊髓及神经根^[7]。任何椎弓根螺钉置入的偏差都可能导致严重并发症^[8-9]。

为了提高手术准确率并减少并发症, 选择合适的椎弓根螺钉入口点至关重要。虽然已有多种椎弓根螺钉置入指导方法被提出, 但这些方法对于初学者而言往往过于复杂^[10-11]。横突轨迹技术 (transverse process trajectory technique, TPT) 利用横突作为引导, 通过钻孔穿透横突皮质, 为椎弓根螺钉的放置提供了通道^[12]。TPT 技术不仅在生物力学上显示出优势, 且学习曲线也较容易被接受。

传统的脊柱侧凸手术依赖于术中 X 线片和医师经验确定置钉位置, 本研究将其定义为徒手技术 (free hand technique, FH)。FH 存在一定的局限性, 包括辐射暴露、手术时间延长以及置钉准确性不确定。为了进一步提升椎弓根螺钉置入的准确性, 机器人技术、荧光透视和计算机辅助手术等先进技术被引入^[13-14]。已有研究证实术中导航技术 (intrao-

perative navigation technology, INT) 能够显著提高 AIS 手术中椎弓根螺钉置入的精确性^[15]。本研究旨在评估针对 AIS 患者顶椎区椎弓根螺钉植入时, 采用 FH 联合 TPT 技术和 INT 联合 TPT 技术两种方案对于置钉精确度及其偏移方向的影响。

资料与方法

一、研究对象

本研究为回顾性研究。以 2021 年 8 月至 2023 年 12 月海南医科大学第一附属医院脊柱外科收治的 33 例接受后路脊柱侧凸矫形内固定术的 AIS 患者为研究对象, 根据术中所用辅助技术分为两组, 即徒手组(FH 组)和导航组(INT 组)。

二、病例纳入与排除标准

纳入标准: ①由两位资深脊柱外科医师根据病情和影像学检查确诊为 AIS; ②有术前和术后完整影像学资料; ③手术由同一位资深脊柱外科医师实施, 且均采取后路矫形内固定术。排除标准: ①存在其他脊柱疾病, 如肿瘤、结核或强直性脊柱炎; ②有脊柱手术史或曾接受前路脊柱松解手术; ③缺少必要的临床和影像学资料; ④存在严重心、脑、肺等重要器官疾病或血管问题, 全身状况不适合实施手术。参与者均由其法定监护人签署知情同意书。本研究已获得海南医科大学第一附属医院伦理委员会审核批准(2024-KYL-188)。

三、手术方法

(一) 安装电生理系统及暴露融合节段

采取气管插管全身麻醉, 患者取俯卧位, 连接神经电生理监测设备, 持续监测运动诱发电位(motor evoked potential, MEP)和体感诱发电位(somatosensory evoked potential, SEP)。C 臂 X 线透视下定位体表标志。消毒铺巾, 于右侧髂后上棘下方 2 cm 处取髂骨。沿后正中中线取纵向切口, 依次切开皮肤、皮下组织及筋膜, 分离肌肉以显露棘突、双侧椎板、植钉椎体的横突部分和关节突, 确保手术区域

得到充分暴露。

(二) 制备钉道

1. 徒手组: 充分暴露植钉椎体横突部分及关节突。使用咬骨钳或磨钻在横突尖端创建一个骨窗, 作为植入螺钉的入口。将开椎器通过骨窗插入, 探索横突上下的松质骨边缘, 沿横突松质骨通道的内上缘缓慢推进。在无明显阻碍的情况下, 调整开椎器角度, 使其达到最终植入螺钉所需的角度, 继续向椎弓根内部深入, 直至达到适当深度。取出开椎器后, 用骨探针检查钉道, 随后用丝锥进行攻丝。确认钉道无误后, 旋入椎弓根螺钉。

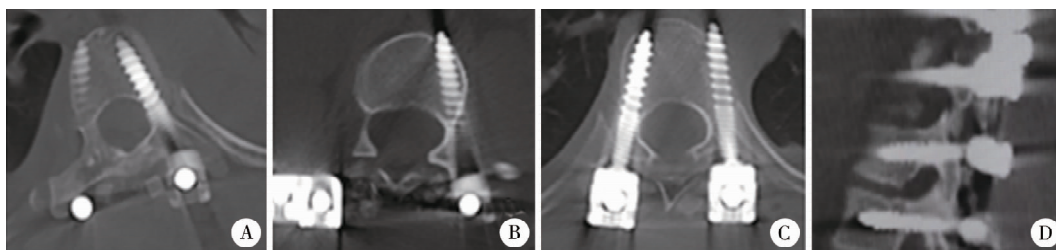
2. 导航组: 充分暴露植钉椎体横突部分及关节突。用咬骨钳或磨钻开口, 于横突尖端形成一骨窗, 作为进钉点。使用导航器规划路径, 确定角度后, 使用开椎器从该骨窗进入。调整开椎器角度, 使其达到最终植入螺钉所需角度, 使用导航探针观察角度; 继续保持阻挡感向椎弓根内进入, 如有阻力可使用导航器评估与椎体及椎弓根关系后, 直至达到适当深度。取出开椎器后, 用导航探针确认横突轨迹无偏移, 随后使用丝锥进行攻丝。确认钉道无误后, 旋入椎弓根螺钉。

(三) 脊柱三维矫形

椎弓根螺钉植入后, 进行小关节融合。利用旋转钉棒、加压、撑开和去旋转等技术进行脊柱三维矫形。使用高速磨钻去除椎板的皮质骨, 然后植入自体髂骨和人工骨。最后, 放置引流管并逐层缝合切口。

四、评价标准

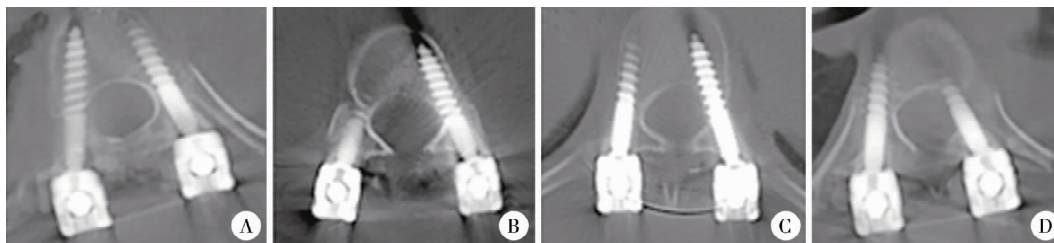
术后通过 CT 影像评估椎弓根螺钉情况, 记录骨皮质穿透的具体位置, 测量穿透长度。根据螺钉穿透顶椎区椎体皮质的位置, 分为内侧椎弓根皮质穿透、前壁椎体穿透、外侧椎弓根皮质穿透或椎间孔穿透(图 1A~1D)。采用 Rao 分级系统评定穿透的严重程度: 0 级表示螺钉未穿透皮质; 1 级表示穿透小于 2 mm; 2 级表示穿透在 2~4 mm; 3 级表示穿透超过 4 mm(图 2A~2D)。将 2 mm 以内的椎弓根内侧壁穿透视为安全或可接受^[16]。



注 A: 穿破椎弓根内侧皮质; B: 穿破椎体前壁; C: 穿破椎弓根外侧皮质; D: 穿破椎间孔间隙

图 1 CT 评估青少年特发性脊柱侧凸矫形手术中椎弓根螺钉穿破方向

Fig. 1 CT evaluation of direction of pedicle screw penetration in AIS children



注 A:0 级钉未破壁; B:1 级钉穿破皮质距离 < 2 mm; C:2 级钉穿破皮质距离 2~4 mm; D:3 级钉穿破皮质距离 > 4 mm

图 2 CT 评估青少年特发性脊柱侧凸矫形手术中椎弓根螺钉穿破程度

Fig.2 CT evaluation of degree of pedicle screw penetration in AIS children

本研究中 0 级、1 级椎弓根螺钉定义为可接受。记录术中及术后血管、神经或内脏损伤等并发症的发生情况。顶椎区置钉平均时长定义为患者顶椎区椎弓根螺钉植入所用时间/该例患者顶椎区椎弓根螺钉数。

五、统计学处理

使用 SPSS 23.0 进行数据分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间差异通过两独立样本 t 检验进行比较。率的比较采用卡方检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、基本信息及治疗情况

本研究共纳入 33 例 AIS 患者, FH 组 16 例、INT 组 17 例,两组患者性别、年龄、Risser 征和主弯柔韧性等差异均无统计学意义 ($P > 0.05$),见表 1。FH 组术前 Cobb 角为 $(65.06 \pm 7.66)^\circ$; INT 组为 $(67.47 \pm 11.97)^\circ$,两组差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。FH 组术后矫形率达 $(85.36 \pm 3.16)\%$, INT 组矫形率为 $(88.82 \pm 1.97)\%$, INT 组的矫形效果优于 FH 组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。FH 组顶椎区置钉时间为 (4.24 ± 2.10) min, INT 组为 (2.65 ± 1.28) min, INT 组的置钉时间明显短于 FH 组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。手术过程中使用椎弓根螺钉数量 FH 组为 (8.75 ± 0.93) 枚, INT 组为 (9.18 ± 0.53) 枚;两组椎弓根螺钉数量、差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 1。

二、椎弓根螺钉置入准确率

两组共置入 269 枚椎弓根螺钉,其中 FH 组可接受椎弓根螺钉数为 90 枚,占总数的 79.7%; INT 组为 139 枚,占总数的 89.1%, FH 组可接受椎弓根螺钉数量少于 INT 组,差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。INT 组凹侧和凸侧分别置入 73 枚和 83 枚椎弓根螺钉,可接受率分别为 91.78% 和 86.75%。FH 组在凹侧和凸侧分别置入了 54 枚和 59 枚,可接受椎弓根螺钉率分别为 85.19% 和 74.58%,均低于 INT 组。两组之间 0 级钉置钉率差异有统计学意义 ($P < 0.05$),特别是在凸侧椎弓根上;1 级钉差异具有统计学意义,且凹侧与凸侧均有统计学意义 ($P < 0.05$);2 级钉差异无统计学意义 ($P > 0.05$);3 级钉差异有统计学意义 ($P < 0.05$),且体现在凹侧。见表 2。

三、误置椎弓根螺钉的分布

两组共有 77 枚椎弓根螺钉穿透了皮质,其中 35 枚穿透了椎弓根内侧皮质,35 枚穿透了椎弓根外侧皮质,6 枚穿透了椎体前壁,1 枚穿透了椎间孔。在 INT 组中,穿透椎弓根内侧皮质的数量为 13 枚,占 INT 组置钉总数的 8.3%,这一比例低于 FH 组的 22 枚(占 19.5%),差异有统计学意义 ($P < 0.05$),且主要体现在凸侧。INT 组穿透椎弓根外侧皮质的数量为 11 枚,占 INT 组置钉总数 7.05%,也低于 FH 组的 24 枚(占 21.2%),差异具有统计学意义 ($P < 0.05$),且主要体现在凸侧。但就穿透椎体前壁和椎间孔的情况而言,两组之间差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 3。

表 1 33 例青少年特发性脊柱侧凸患者基本信息及治疗情况

Table 1 Basic profiles and treatments of 33 AIS children

分组	性别(例)		年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	Risser 征等级 ($\bar{x} \pm s$, 级)	主弯柔韧性 ($\bar{x} \pm s$, %)	住院天数 ($\bar{x} \pm s$, d)
	男	女				
徒手组($n=16$)	4	12	12.44 ± 2.52	3.81 ± 0.66	44.31 ± 11.16	10.13 ± 3.91
导航组($n=17$)	5	12	12.53 ± 3.04	3.88 ± 0.70	43.94 ± 8.90	10.94 ± 4.23
t/χ^2 值	$\chi^2 = 0.081$		$t = -0.094$	$t = -0.296$	$t = 0.106$	$t = -0.574$
P 值	0.776		0.926	0.769	0.916	0.570

续上表

分组	术前 Cobb 角 ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)	术后 Cobb 角 ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)	主弯矫正率 ($\bar{x} \pm s, \%$)	顶椎区椎弓根螺钉数目 ($\bar{x} \pm s, \text{枚}$)	顶椎区置钉平均时长 ($\bar{x} \pm s, \text{min}$)
徒手组($n=16$)	65.06 ± 7.66	8.75 ± 1.48	85.36 ± 3.16	8.75 ± 0.93	4.24 ± 2.10
导航组($n=17$)	67.47 ± 11.97	7.71 ± 1.49	88.82 ± 1.97	9.18 ± 0.53	2.65 ± 1.28
t/χ^2 值	$t = -0.683$	$t = 2.023$	$t = -3.801$	$t = -1.631$	$t = 2.633$
P 值	0.500	0.060	0.001	0.113	0.013

表 2 徒手组与导航组青少年特发性脊柱侧凸患儿术中椎弓根螺钉穿破皮质程度比较[$n(\%)$]Table 2 Distortion of violated cortexes by misplaced screw of FH and INT groups of AIS children[$n(\%)$]

穿破程度 分级	徒手组			导航组		
	凹侧	凸侧	合计	凹侧	凸侧	合计
0 级钉	32(59.3)	31(52.5)	63(55.8)	59(80.8)	70(84.3) ^a	129(82.7) ^b
1 级钉	14(25.9)	13(22.0)	27(23.9)	8(11.0) ^c	2(2.4) ^d	10(6.4) ^e
2 级钉	3(5.6)	9(15.3)	12(10.6)	5(6.8)	9(10.8)	14(9.0)
3 级钉	5(9.3)	6(10.2)	11(9.7)	1(1.4) ^f	2(2.4)	3(1.9) ^g
合计	54(100)	59(100)	113(100)	73(100)	83(100)	156(100)

注 徒手组与导航组凹侧、凸侧及合计穿破程度比较, ^a:凸侧、0 级钉, $\chi^2 = 3.954, P = 0.047$; ^b:0 级钉合计, $\chi^2 = 4.013, P = 0.045$; ^c:凹侧、1 级钉, $\chi^2 = 3.868, P = 0.049$; ^d:凸侧、1 级钉, $\chi^2 = 11.480, P = 0.001$; ^e:1 级钉合计, $\chi^2 = 12.566, P < 0.001$; ^f:凹侧、3 级钉, $\chi^2 = 4.092, P = 0.043$; ^g:3 级钉合计, $\chi^2 = 7.227, P = 0.007$

表 3 徒手组与导航组青少年特发性脊柱侧凸患儿术中椎弓根螺钉穿破位置比较[$n(\%)$]Table 3 Distribution of screws position in FH and INT groups of AIS children[$n(\%)$]

穿破位置	徒手组			导航组		
	凹侧	凸侧	合计	凹侧	凸侧	合计
内侧皮质	10(45.5)	12(42.9)	22(44.0)	7(46.7)	6(50.0) ^a	13(48.1) ^b
外侧皮质	10(45.5)	14(50.0)	24(48.0)	6(40.0)	5(41.7) ^c	11(40.7) ^d
椎体前壁	1(4.5)	2(7.1)	3(6.0)	2(13.3)	1(8.3)	3(11.1)
椎间孔	1(4.5)	0	1(2.0)	0	0	0
合计	22(100)	28(100)	50(100)	15(100)	12(100)	27(100)

注 徒手组与导航组穿破位置比较, ^a:凸侧、穿破内侧皮质, $\chi^2 = 4.173, P = 0.041$; ^b:穿破内侧皮质合计, $\chi^2 = 5.453, P = 0.020$; ^c:凸侧、穿破外侧皮质, $\chi^2 = 7.224, P = 0.007$; ^d:穿破外侧皮质合计, $\chi^2 = 8.828, P = 0.003$

四、并发症

两组均成功完成手术, FH 组有 1 例出现了椎弓根螺钉穿透内侧皮质并突入椎管的情况, 但术中神经电生理监测结果正常; 术后随访期间, 该患者并未出现任何运动障碍或下肢感觉异常的情况。此外, 两组均无一例在手术过程中发生脊髓、神经或血管损伤。随访时间 12 ~ 16 个月, 无一例发生椎弓根螺钉松动、断钉或断棒等并发症。

五、典型病例

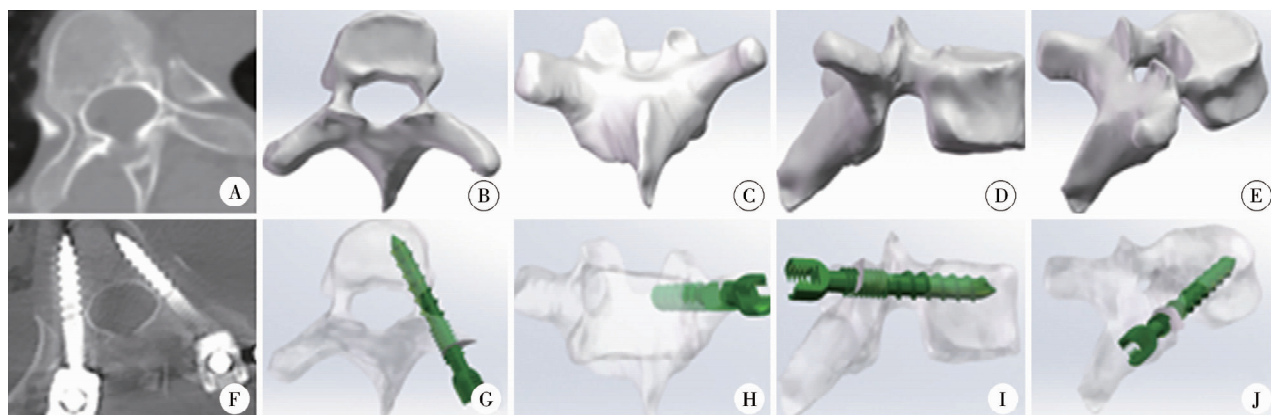
图 3 为 TPT 技术示意图, 应用 3D 建模技术, 从轴面、冠状面、矢状面等观察 TPT 技术(图 3A ~ 3J)。图 4 为导航引导下 TPT 技术顶椎区置钉典型病例, 女, 14 岁, 青少年特发性脊柱侧凸, 顶椎位于第 8 胸椎, 行后路融合, 对比第 6、7 胸椎顶椎区置钉前后脊柱全长正位 X 线片及术后 2 年脊柱全长正位 X 线片。术后 2 年胸弯无进展(图 4A ~ 4G)。

讨论

AIS 是一种病因不明的脊柱三维畸形, 主要影响青春期患者^[17-18]。如果疾病早期没有进行有效治疗, 部分患者会影响心理健康, 甚至心肺功能。当 Cobb 角超过 45° 时, 通常推荐采用椎弓根螺钉后路内固定手术治疗^[19]。在进行 AIS 矫形手术时, 与常规内固定设备相比, 椎弓根螺钉提供了更高的稳定性和更强的矫形效果, 同时减少了手术所需固定节段, 从而降低了手术风险^[6]。

一、AIS 患者顶椎区椎体解剖结构的特点

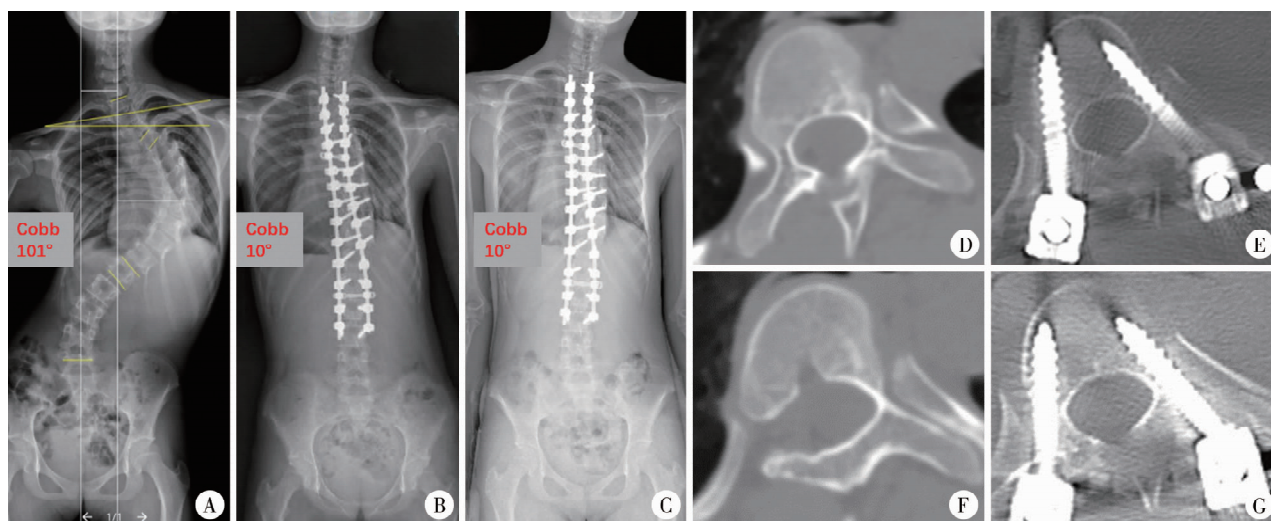
在进行 AIS 患者的顶椎区椎弓根螺钉置入手术时, 因其解剖结构的复杂性, 这一过程充满了挑战^[7,20]。与非脊柱侧凸患者相比, AIS 患者的椎弓根狭窄畸形更为明显, 这导致在手术过程中, 椎弓根



注 A:D1 型椎弓根术前轴面 CT; B:D1 型椎弓根轴面示意图; C:D1 型椎弓根冠状面示意图; D:D1 型椎弓根矢状面示意图; E:D1 型椎弓根侧后方示意图; F:TPT 技术轴面 CT; G:TPT 技术轴面示意图; H:TPT 技术冠状面示意图; I:TPT 技术矢状面示意图; J:TPT 技术侧后方示意图

图 3 青少年特发性脊柱侧凸矫形手术中横突轨迹技术示意图

Fig.3 TPT diagrammatic sketch in AIS children



注 A:术前脊柱全长正位 X 线片; B:术后脊柱全长正位 X 线片; C:术后 2 年脊柱全长正位 X 线片; D:术前第 6 胸椎 CT 轴面图; E:术后第 6 胸椎 CT 轴面图; F:术前第 7 胸椎 CT 轴面图; G:术后第 7 胸椎 CT 轴面图

图 4 青少年特发性脊柱侧凸矫形手术中导航引导下横突轨迹技术顶椎区置钉典型病例图片

Fig.4 Navigation-assisted TPT technology for pedicle screw placement in vertebral apex;a typical case study

置钉的风险更大,螺钉误置率也更高^[21]。特别是在顶椎区,包括顶椎及其相邻的上下椎体,椎弓根的狭窄和畸形尤为显著,这极大妨碍了手术中螺钉置入的准确性^[22]。为提高置钉的精确性,学者们对 AIS 患者顶椎区椎弓根的形态学特征进行了深入研究^[23-24]。Davis 通过 CT 评估发现,AIS 患者的椎弓根形态存在双侧狭窄畸形和不对称性,特别是在凸侧,椎弓根轨迹更为尖锐^[25]。此外,AIS 患者的顶椎区还伴有椎体旋转和脊髓偏移等解剖异常,这些因素进一步增加了置钉的风险和螺钉误置率。因此,细致研究 AIS 患者顶椎区椎弓根的形态学特征,对于提高手术安全性和精确性至关重要^[20,22]。

二、TPT 技术的应用

TPT 技术是一种新型的胸椎椎弓根螺钉植入方法。TPT 的起点位于横突尖端的头 1/3 处,利用横

突作为引导,通过钻孔穿透横突皮质,为椎弓根螺钉的放置提供了通道^[12]。既往研究表明,胸椎横突的长度、宽度和厚度适合放置椎弓根螺钉,且其自然倾斜角度为螺钉提供了理想的植入路径^[26]。研究发现,椎弓根与横突之间的通道结构具有一致性,这表明椎弓根内的松质骨一直延伸到横突内,构成了一个连续的骨性通道,这种通道在所有研究椎体中普遍存在,且不受年龄、性别的影响,进一步增强了手术的准确性^[17,27]。与传统技术相比,TPT 在置钉精度和轴向拔出强度方面表现相当,但在去旋转力方面有所提升^[28]。此外,有角度的椎弓根螺钉相较于平行螺钉,在轴向拔出阻力和承受载荷方面显示出优势,这表明 TPT 技术能够提供更强的固定效果^[12,27]。TPT 技术的特点在于其利用横突轨迹,使得在脊柱侧凸和旋转的情况下,螺钉的放置

更为容易,从而提高了手术的准确性和生物力学优势^[12,26,29]。

三、计算机辅助导航技术在 AIS 手术中的应用

为了提升 AIS 患者椎弓根螺钉置入的精确性,计算机辅助导航技术被广泛应用于临床,并证实能显著提高手术的精确性^[30]。自计算机导航技术引入脊柱外科领域以来,该技术已成为现代外科不可或缺的一部分,尤其在提升置钉准确性和手术安全性方面起到了关键作用^[15,31-32]。多项研究已证实,与传统徒手技术相比,计算机导航辅助下的椎弓根螺钉置入具有更高的优良率,皮质穿破发生率显著降低^[33-34]。此外,导航辅助的螺钉展现出更大的拉出强度和更高的松动负荷阈值,从而降低了术中并发症的风险。导航系统通过实时监控,能够即时检测到椎弓根螺钉在椎弓根内的位置偏移,从而减少调整螺钉和二次手术的风险^[35]。计算机辅助导航技术通过减少潜在不安全螺钉的置入率,并大幅提高最佳螺钉放置的概率,从而显著提升了椎弓根螺钉放置的精确性和安全性^[36]。

四、计算机导航辅助技术结合 TPT 技术的应用

在胸椎的常规植钉手术中,通常会选择横突中轴线与上关节突中线的交汇点作为螺钉的进入位置。然而,由于上关节突经常被下关节突所遮挡,其确切的中点难以被准确找到。一个理想的进针点应该是固定不变、容易定位、手术过程简洁、微创,且具有高度精确度。目前尚无 TPT 技术应用于 AIS 患者的临床报道,既往已知 TPT 技术应用于胸椎椎弓根螺钉植入中,显示出提高手术效率和安全性潜力^[37]。在进行 AIS 患者的顶椎区椎弓根螺钉植入时,由于该区域椎弓根狭窄、椎体旋转及脊髓偏移等解剖变异较为常见,这使得精确置钉面临极大挑战。在这种情况下,TPT 技术的应用显得尤为关键,因为它能够应用横突的自然倾斜角度,为螺钉提供了理想的植入路径,减少手术中的不确定性。计算机辅助导航技术结合 TPT 技术将进一步提高椎弓根螺钉放置的精确性,降低螺钉突破椎弓根内侧壁的风险,降低脊髓损伤的可能性^[38]。本研究中,内外侧椎弓根皮质穿破发生率 INT 组均小于 FH 组,且差异具有统计学意义($P < 0.05$),降低内侧椎弓根螺钉破壁风险,将进一步减少椎弓根螺钉对脊髓造成损害的概率。INT 组的总体椎弓根螺钉可接受率为 89.1%,高于 FH 组的 79.7%,且内、外侧椎弓根皮质穿破发生率也低于 FH 组,进一步证实了计算机导航技术在提高 AIS 患者置钉精准度方

面的价值。

五、本研究局限性

本研究存在一定的局限性。首先,33 例 AIS 患者均来自单一中心;此外,缺乏更长期随访数据,限制了进一步的影像学比较。未来需继续开展多中心、大样本的研究以探索术中计算机导航技术结合 TPT 技术对于矫治 AIS 的准确性和安全性的价值。

综上,在 AIS 矫形手术中,FH 组和 INT 组均能实现较高的螺钉置入精度。与仅采用徒手技术和 TPT 技术的组合相比,导航技术能够在不影响手术时间的情况下,通过实时监测显著降低术中椎体和椎弓根皮质穿透的风险,进而减少因螺钉穿透皮质而引发的并发症。此外,INT 组相较于 FH 组在提高可接受的椎弓根螺钉数量方面表现更佳。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 马昂然、汤三泉负责文献检索,文王强、马昂然负责论文设计,马昂然、李国军负责数据收集,马昂然、何贤波、林有才、林素羽负责研究结果分析与讨论,王文博、潘松利负责研究伦理审查申请与沟通协调,陈焕雄负责全文知识性内容的审读与修正

参 考 文 献

- [1] Montemurro N, Ricciardi L, Scerrati A, et al. The potential role of dysregulated miRNAs in adolescent idiopathic scoliosis and 22q11.2 deletion syndrome [J]. J Pers Med, 2022, 12 (11): 1925. DOI:10.3390/jpm12111925.
- [2] Singh H, Shipra, Sharma V, et al. The first study of epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis shows lower prevalence in females of Jammu and Kashmir, India [J]. Am J Transl Res, 2022, 14 (2): 1100-1106.
- [3] 陈焕雄, 何贤波, 李国军, 等. 术中导航漂移校准技术对 Lenke 1 型青少年特发性脊柱侧凸顶椎区置钉精度的影响 [J]. 海南医学院学报, 2023, 29 (6): 444-451. DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.20230116.001.
Chen HX, He XB, Li GJ, et al. Accuracy of screw placement in the apical region of Lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis surgery using a calibration technique for the intraoperative navigation error [J]. J Hainan Med Univ, 2023, 29 (6): 444-451. DOI: 10.13210/j.cnki.jhmu.20230116.001.
- [4] 周松, 朱泽章, 邱勇, 等. 青少年特发性胸椎侧凸顶椎区椎弓根及椎管的形态学特征 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23 (2): 113-118. DOI:10.3969/j.issn.1004-406X.2013.02.04.
Zhou S, Zhu ZZ, Qiu Y, et al. Morphological abnormalities of pedicles and spinal canal in apical region of adolescent idiopathic thoracic scoliosis [J]. Chin J Spine Spinal Cord, 2013, 23 (2): 113-118. DOI:10.3969/j.issn.1004-406X.2013.02.04.
- [5] 江华, 肖增明, 詹新立, 等. Lenke 1 型特发性脊柱侧凸患者术后顶椎区残留旋转的危险因素分析 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24 (15): 1428-1430. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.15.17.
Jiang H, Xiao ZM, Zhan XL, et al. Analysis of risk factors for residual rotation of parietal region in patients with Lenke type 1 idiopathic scoliosis after surgery [J]. Orthop J China, 2016, 24 (15): 1428-1430. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.

15. 17.
- [6] Suk SI, Kim WJ, Lee SM, et al. Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: are they really safe? [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26 (18): 2049–2057. DOI: 10. 1097/00007632-200109150-00022.
- [7] 侯刚, 陈建庭, 张宇, 等. 青少年特发性脊柱侧凸患者顶椎区脊髓位置变化及其临床意义[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2009, 19 (12): 894–898. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-406X. 2009. 12. 03.
Hou G, Chen JT, Zhang Y, et al. Variation and its clinical relevance of spinal cord at apex of curve in adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Chin J Spine Spinal Cord*, 2009, 19 (12): 894–898. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-406X. 2009. 12. 03.
- [8] Parker SL, Amin AG, Santiago-Dieppa D, et al. Incidence and clinical significance of vascular encroachment resulting from free-hand placement of pedicle screws in the thoracic and lumbar spine: analysis of 6816 consecutive screws [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39 (8): 683–687. DOI: 10. 1097/BRS. 0000000000000221.
- [9] Mac-Thiong JM, Parent S, Poitras B, et al. Neurological outcome and management of pedicle screws misplaced totally within the spinal canal [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38 (3): 229–237. DOI: 10. 1097/BRS. 0b013e31826980a9.
- [10] Lee CS, Park SA, Hwang CJ, et al. A novel method of screw placement for extremely small thoracic pedicles in scoliosis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36 (16): E1112–E1116. DOI: 10. 1097/BRS. 0b013e3181ffea2.
- [11] Lehman RA Jr, Kang DG, Lenke LG, et al. The ventral lamina and superior facet rule: a morphometric analysis for an ideal thoracic pedicle screw starting point [J]. *Spine J*, 2014, 14 (1): 137–144. DOI: 10. 1016/j. spine. 2013. 06. 092.
- [12] Lonner B, Verma K, Roonprapunt C, et al. The transverse process trajectory technique: an alternative for thoracic pedicle screw implantation—radiographic and biomechanical analysis [J]. *Int J Spine Surg*, 2021, 15 (2): 315–323. DOI: 10. 14444/8041.
- [13] Gokcen HB, Erdogan S, Ozturk S, et al. Sagittal orientation and uniform entry for thoracic pedicle screw placement with free-hand technique: a retrospective study on 382 pedicle screws [J]. *Int J Surg*, 2018, 51: 83–88. DOI: 10. 1016/j. ijsu. 2018. 01. 006.
- [14] Molliqaj G, Schatlo B, Alaid A, et al. Accuracy of robot-guided versus freehand fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery [J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42 (5): E14. DOI: 10. 3171/2017. 3. FOCUS179.
- [15] Jin MR, Liu Z, Liu XY, et al. Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type I: comparison between O-arm navigation and free-hand technique [J]. *Eur Spine J*, 2016, 25 (6): 1729–1737. DOI: 10. 1007/s00586-015-4012-0.
- [16] Rao G, Brodke DS, Rondina M, et al. Comparison of computerized tomography and direct visualization in thoracic pedicle screw placement [J]. *J Neurosurg*, 2002, 97 (2 Suppl): 223–226. DOI: 10. 3171/spi. 2002. 97. 2. 0223.
- [17] Kim YJ, Lenke LG, Cho SK, et al. Comparative analysis of pedicle screw versus hook instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29 (18): 2040–2048. DOI: 10. 1097/01. brs. 0000138268. 123 24. 1a.
- [18] 郭尚玉, 王达辉. 结合人工智能诊断青少年特发性脊柱侧弯的新思路[J]. *临床小儿外科杂志*, 2024, 23 (1): 89–92. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202211044-018.
- Guo SY, Wang DH. Combining artificial intelligence for diagnosing adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Clin Ped Sur*, 2024, 23 (1): 89–92. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202211044-018.
- [19] 赵军, 王培鑫, 王兴盛, 等. 青少年特发性脊柱侧凸脊柱融合术的研究进展 [J]. *临床小儿外科杂志*, 2023, 22 (7): 698–700. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202209052-018.
- Zhao J, Wang PX, Wang XS, et al. Research advances in spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Clin Ped Sur*, 2023, 22 (7): 698–700. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-2022 09052-018.
- [20] Modi HN, Suh SW, Fernandez H, et al. Accuracy and safety of pedicle screw placement in neuromuscular scoliosis with free-hand technique [J]. *European Spine Journal*, 2008, 17 (12): 1686–1696. DOI: 10. 1007/s00586-008-0795-6.
- [21] Guzek RH, Mitchell SL, Krakow AR, et al. Morphometric analysis of the proximal thoracic pedicles in Lenke II and IV adolescent idiopathic scoliosis: an evaluation of the feasibility for pedicle screw insertion [J]. *Spine Deform*, 2021, 9 (6): 1541–1548. DOI: 10. 1007/s43390-021-00377-5.
- [22] Yang NN, Luo M, Zhao SX, et al. Morphological differences between the pedicles in nondystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type 1 and those in adolescent idiopathic scoliosis [J]. *World Neurosurg*, 2020, 144: e9–e14. DOI: 10. 1016/j. wneu. 2020. 06. 036.
- [23] Kuraishi S, Takahashi J, Hirabayashi H, et al. Pedicle morphology using computed tomography-based navigation system in adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26 (1): 22–28. DOI: 10. 1097/BSD. 0b013e31823162ef.
- [24] Watanabe K, Lenke LG, Matsumoto M, et al. A novel pedicle channel classification describing osseous anatomy: how many thoracic scoliotic pedicles have cancellous channels? [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35 (20): 1836–1842. DOI: 10. 1097/BRS. 0b013e3181d3cfde.
- [25] Davis CM, Grant CA, Pearcy MJ, et al. Is there asymmetry between the concave and convex pedicles in adolescent idiopathic scoliosis? A CT investigation [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2017, 475 (3): 884–893. DOI: 10. 1007/s11999-016-5188-2.
- [26] Cui XG, Cai JF, Sun JM, et al. Morphology study of thoracic transverse processes and its significance in pedicle-rib unit screw fixation [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28 (2): E74–E77. DOI: 10. 1097/BSD. 0000000000000163.
- [27] 钟晖, 陈建明, 张成程, 等. 椎弓根-横突通道植钉技术的临床应用研究 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2019, 33 (12): 1486–1490. DOI: 10. 7507/1002-1892. 201810124.
- Zhong H, Chen JM, Zhang CC, et al. Clinical application of vertebral arch-transverse pathway during pedicle screw implantation [J]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2019, 33 (12): 1486–1490. DOI: 10. 7507/1002-1892. 20181 0124.
- [28] Huang YJ, Peng MX, He SQ, et al. Biomechanical study of the funnel technique applied in thoracic pedicle screw replacement [J]. *Afr Health Sci*, 2014, 14 (3): 716–724. DOI: 10. 4314/ahs. v14i3. 30.
- [29] Heller JG, Shuster JK, Hutton WC. Pedicle and transverse process screws of the upper thoracic spine. Biomechanical comparison of loads to failure [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1999, 24 (7): 654–658. DOI: 10. 1097/00007632-199904010-00008.
- [30] Fan Y, Du JP, Zhang JN, et al. Comparison of accuracy of pedicle screw insertion among 4 guided technologies in spine surgery [J].

- Med Sci Monit, 2017, 23 : 5960 - 5968. DOI: 10. 12659/msm. 905713.
- [31] Nolte LP, Zamorano LJ, Jiang Z, et al. Image-guided insertion of transpedicular screws. A laboratory set-up [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1995, 20 (4) : 497 - 500. DOI: 10. 1097/00007632-1995 02001-00016.
- [32] Liu Z, Jin MR, Qiu Y, et al. The superiority of intraoperative o-arm navigation-assisted surgery in instrumenting extremely small thoracic pedicles of adolescent idiopathic scoliosis: a case-control study [J]. Medicine (Baltimore), 2016, 95 (18) : e3581. DOI: 10. 1097/MD. 0000000000003581.
- [33] Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques [J]. Eur Spine J, 2012, 21 (2) : 247 - 255. DOI: 10. 1007/s00586-011-2011-3.
- [34] Modi H, Suh SW, Song HR, et al. Accuracy of thoracic pedicle screw placement in scoliosis using the ideal pedicle entry point during the freehand technique [J]. Int Orthop, 2009, 33 (2) : 469 - 475. DOI: 10. 1007/s00264-008-0535-x.
- [35] Ughwanogho E, Patel NM, Baldwin KD, et al. Computed tomography-guided navigation of thoracic pedicle screws for adolescent idiopathic scoliosis results in more accurate placement and less screw removal [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37 (8) : E473 - E478. DOI: 10. 1097/BRS. 0b013e318238bbd9.
- [36] Kaur J, Koltsov JCB, Kwong JW, et al. Does navigation make spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis safer? Insights from a national database [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2021, 46 (19) : E1049 - E1057. DOI: 10. 1097/BRS. 0000000000004037.
- [37] 钟晖, 陆声, 陈建明, 等. 胸椎“椎弓根-横突通道”的结构分析及经此通道置钉的可行性研究 [J]. 解放军医药杂志, 2019, 31 (2) : 81 - 85. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095 - 140X. 2019. 02. 020.
- Zhong H, Lu S, Chen JM, et al. Structural analysis of “pedicle of vertebral arch-transverse pathway” of thoracic spine and feasibility of nail placement through the pathway [J]. Med Pharm J Chin PLA, 2019, 31 (2) : 81 - 85. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095 - 140X. 2019. 02. 020.
- [38] Meng XT, Guan XF, Zhang HL, et al. Computer navigation versus fluoroscopy-guided navigation for thoracic pedicle screw placement: a meta-analysis [J]. Neurosurg Rev, 2016, 39 (3) : 385 - 391. DOI: 10. 1007/s10143-015-0679-2.
- (收稿日期: 2024-08-26)
- 本文引用格式:** 马昂然, 文王强, 李国军, 等. 导航引导下横突轨迹技术在青少年特发性脊柱侧凸顶椎区置钉中的应用 [J]. 临床小儿外科杂志, 2025, 24 (2) : 143 - 151. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202408041-008.
- Citing this article as:** Ma AR, Wen WQ, Li GJ, et al. Navigation-guided transverse process trajectory technique for pedicle screw placing at apical vertebral region in adolescent idiopathic scoliosis [J]. J Clin Ped Sur, 2025, 24 (2) : 143 - 151. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202408041-008.

· 编者 · 作者 · 读者 ·

本刊关于作者署名的书写要求

作者姓名在文题下按顺序排列, 排序应在投稿时写明, 在投稿后编排过程中不得再作更改, 如确需改动时必须出示单位证明以及所有作者亲笔签名的署名无异议书面证明。作者应同时具备以下四项条件: ①参与论文选题和设计, 或参与资料分析与解释; ②起草或修改论文中关键性理论或其他主要内容; ③能按编辑部的修改意见进行核修, 对学术问题进行解答, 并最终同意论文发表; ④除了负责本人的研究贡献外, 同意对研究工作各方面的诚信问题负责。仅参与获得资金或收集资料者不能列为作者, 仅对科研小组进行一般管理也不宜列为作者。请提供中英文作者及作者单位信息。不建议著录同等贡献作者, 同一单位同一科室作者不宜著录同等贡献, 作者申请著录同等贡献时需提供全部作者的贡献声明, 期刊编辑委员会进行核查。

仅有 1 位作者的, 不再标注“通信作者:”, 直接在作者单位下另起一行著录 Email 地址。

示例:

陈楠

上海交通大学医学院附属瑞金医院肾内科, 上海 200025