

· 临床论著 ·

开放获取

脊柱畸形截骨矫形术神经损伤的相关因素<sup>△</sup>

张耀申, 海涌\*, 刘玉增, 周立金, 杨晋才, 苏庆军, 臧磊, 孟祥龙

(首都医科大学附属北京朝阳医院骨科, 北京 100020)

**摘要:** [目的] 探讨脊柱畸形截骨矫形术中神经损伤的危险因素。[方法] 2016 年 1 月—2021 年 12 月截骨矫形手术治疗脊柱畸形 312 例纳入本研究, 观察术中神经电生理监测 (intra-operative neurophysiological monitoring, IONM) 情况, 通过单因素和多因素逻辑回归分析筛选发生神经损伤的相关因素。[结果] 312 例患者术中发生 IONM 异常 26 例, 占比 8.3%。术后发生神经损伤 11 例, 占比 3.5%。IONM 异常组术前 MRI 脊髓有无异常比率 [有/无, (5/21) vs (7/279),  $P=0.017$ ]、术前 CT 椎管有无异常比率 [有/无, (8/18) vs (25/261),  $P=0.029$ ]、Cobb 角  $>110^\circ$  占比 [例 (%), 19 (73.1) vs 31 (10.8),  $P=0.011$ ]、柔韧度  $<10\%$  占比 [例 (%), 20 (76.9) vs 29 (10.1),  $P<0.001$ ]、截骨等级比率 [ $\leq 2/\geq 3$ , (4/22) vs (193/93),  $P=0.005$ ]、手术时间 [(262.4 $\pm$ 27.3) min vs (215.6 $\pm$ 30.3) min,  $P=0.019$ ] 均显著高于 IONM 无异常组。两组年龄、性别、BMI、既往脊柱手术史、术前主弯角度、矫正率、术中出血量比较的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。多因素逻辑回归分析显示, 术前柔韧度差 ( $OR=9.824$ ,  $P<0.001$ )、术前 Cobb 角度大 ( $OR=6.751$ ,  $P=0.004$ )、术前 CT 椎管异常 ( $OR=3.343$ ,  $P=0.017$ )、术前 MRI 脊髓异常 ( $OR=3.117$ ,  $P=0.021$ )、手术截骨等级大 ( $OR=2.897$ ,  $P=0.026$ ) 和手术时间长 ( $OR=1.043$ ,  $P=0.031$ ) 是脊柱畸形截骨矫形术中发生 IONM 异常和神经损伤并发症的独立危险因素。[结论] 脊柱畸形截骨矫形手术是治疗重度脊柱畸形的有效方法, 术中应高度警惕神经损伤的风险, 术前核磁和术前 CT 三维重建检查仔细评估脊髓和椎管状况非常重要, 手术中尽量减少截骨等级和手术时间, 将有益于避免或减少脊柱畸形截骨矫形术中神经损伤。

**关键词:** 脊柱畸形, 截骨矫形术, 神经损伤, 危险因素

中图分类号: R683.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-8478 (2024) 13-1153-05

**Factors related to nerve injury in corrective surgery with osteotomy for spinal deformity // ZHANG Yao-shen, HAI Yong, LIU Yu-zeng, ZHOU Li-jin, YANG Jin-cai, SU Qing-jun, ZANG Lei, MENG Xiang-long. Department of Orthopaedics, Beijing Chaoyang Hospital, Capital Medical University, Beijing 100020, China**

**Abstract:** [Objective] To search the risk factors of nerve injury during correction surgery with osteotomy for spinal deformity. [Methods] A retrospective study was conducted on 312 patients who received osteotomy and instrumented correction with intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) for spinal deformities in our department from January 2016 to December 2021. The factors related to nerve injury were screened by univariate comparison and multifactorial logistic regression analysis. [Results] IONM abnormalities occurred in 26 of 312 patients, accounting for 8.3%, while postoperative nerve injury occurred in 11 cases (3.5%). In term of univariate comparison, the IONM abnormal group proved significantly greater than the normal group in terms of the proportion of preoperative MRI spinal cord abnormalities [Yes/No, (5/21) vs (7/279),  $P=0.017$ ], the proportion of preoperative CT spinal canal abnormalities [Yes/No, (8/18) vs (25/261),  $P=0.029$ ], and the proportion of Cobb angle  $>110^\circ$  [cases (%), 19 (73.1) vs 31(10.8),  $P=0.011$ ], flexibility  $<10\%$  [Cases (%), 20 (76.9) vs 29 (10.1),  $P<0.001$ ], osteotomy grade [ $\leq 2/\geq 3$ , (4/22) vs (193/93),  $P=0.005$ ] and operation time [(262.4 $\pm$ 27.3) min vs (215.6 $\pm$ 30.3) min,  $P=0.019$ ]. However, there were no significant differences in age, sex, BMI, previous spinal surgery history, preoperative main curvature angle, correction rate, and intraoperative blood loss between the two groups ( $P>0.05$ ). As results of multi-factor logistic regression analysis, the poor preoperative flexibility ( $OR=9.824$ ,  $P<0.001$ ), large preoperative Cobb angle ( $OR=6.751$ ,  $P=0.004$ ), preoperative abnormal spinal canal CT ( $OR=3.343$ ,  $P=0.017$ ), preoperative abnormal spinal cord MRI ( $OR=3.117$ ,  $P=0.021$ ), high grade of osteotomy ( $OR=2.897$ ,  $P=0.026$ ) and long operation time ( $OR=1.043$ ,  $P=0.031$ ) were independent risk factors for IONM abnormality and nerve injury complications during corrective surgery for spinal deformities. [Conclusion] Corrective surgery is an effective method for the treatment of severe spinal deformity, while

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.11006A

<sup>△</sup>基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(编号:2019YFC0120604);国家自然科学基金项目(编号:8177090118)

作者简介:张耀申,主治医师,博士在读,研究方向:脊柱外科,(电子信箱)zhangyaoshen08@163.com

\*通信作者:海涌,(电子信箱)yong.hai@cemu.edu

the risk of nerve injury should be highly alert during surgery. It is very important to carefully evaluate spinal cord and spinal canal abnormalities by preoperative MRI and preoperative CT three-dimensional reconstruction. Minimizing osteotomy extent and operation time during surgery will be beneficial to avoid or reduce nerve injury during corrective surgery for spinal deformities.

**Key words:** spinal deformities, corrective osteotomy, nerve injury, risk factors

随着脊柱畸形手术技术的提高,截骨术已成为治疗脊柱畸形常用的一种有效的手术方式,特别是对于严重僵硬性脊柱畸形的治疗,截骨术能取得良好的矫形效果。研究表明,脊柱畸形矫形术中神经并发症的发生率为 0.3%~17.6%<sup>[1-4]</sup>。神经损伤并发症尤其是截瘫往往是灾难性的,如何预防和减少神经并发症的发生尤为重要。术中神经电生理监测(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)是一种有效的方法,本科 2016 年 1 月—2021 年 12 月行脊柱畸形截骨矫形手术共 312 例,术中均应用 IONM,现对术中发生 IONM 异常和神经损伤可能的危险因素进行分析和探讨,报道如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 纳入与排除标准

纳入标准:(1)影像学资料显示僵硬性脊柱畸形(主弯柔韧性<25%)者;(2)成功接受一期后入路椎弓根螺钉置入联合截骨矫形植骨融合术;(3)术后至少随访 1 年,相关临床资料与影像学资料齐全者。

排除标准:(1)由其他病因引起的成人脊柱侧凸包括病理性、神经肌肉型等者;(2)既往已有脊柱畸形相关手术史或前期已进行前路或后路松解手术者;(3)合并其他神经内科疾病者;(4)因各种原因导致截骨手术无法进行,临床资料与影像学资料不全者。

### 1.2 一般资料

回顾性分析 2016 年 1 月—2021 年 12 月本科收治的 312 例脊柱畸形行截骨矫形手术患者的临床资料,男 115 例,女 197 例,年龄 10~75 岁,平均(24.8±16.2)岁。其中先天性脊柱侧凸 92 例,特发性脊柱侧凸 121 例,其他类型(结核、退行性、神经肌肉型)脊柱侧弯 99 例。本研究经医院伦理委员会审批,所有患者均知情同意。

### 1.3 手术方法

所有患者术前均行全脊柱正侧位及 Bending 相 X 线片检查,测量 Cobb 角,明确脊柱柔韧性。并行术前全脊柱 CT 平扫+三维重建了解脊柱畸形情况,明确有无椎管内骨嵴、Chiari 畸形以及有无其他椎管畸形和狭窄情况,同时测量椎弓根有关数据,用以规划

术中椎弓根螺钉置入和螺钉的选择。MRI 检查了解有无脊髓异常信号、脊髓栓系、脊髓空洞等脊髓异常,明确有无脊柱结构异常、椎管狭窄及脊髓和神经根畸形情况,评估可能的脊髓神经损伤风险。根据患者临床症状、神经系统查体、影像学检查制订手术计划,确定减压部位及融合节段。

所有患者均采用全麻,俯卧位,后正中切口,常规显露术前设计的脊柱矫形和内固定范围,在关键椎体置入椎弓根螺钉,后路钉棒系统内固定三维矫形。根据脊柱畸形的情况,脊柱截骨分别采用 Smith-Petersen 截骨、多节段 Ponte 截骨、经椎弓根 V 形截骨术(pedicle subtraction osteotomy, PSO)或经后路全脊椎截骨术(posterior vertebral column resection, PVCR)。截骨患者于截骨椎体头尾两侧椎弓根,至少置入 2~3 枚椎弓根螺钉内固定,脊柱侧后凸畸形严重者,可同时行胸廓成形术,脊柱融合植骨可采用切除的肋骨、脊柱截骨组织、同种异体骨。

所有患者均应用 IONM,并常规进行唤醒试验,手术中脊柱畸形截骨前常规静脉输入甲强龙 500 mg;双下肢运动和感觉诱发电位波幅降低超过 50%,潜伏期延长超过 10%视为异常,并行唤醒试验,如唤醒试验证实脊髓损伤,立即探查截骨处有无卡压脊髓或神经根等异常情况,如有明显卡压,应立即进行减压,术中对脊髓、神经根进行冷盐水浸泡,松开内固定器械,减少矫形度数,提升患者血压,同时甲强龙冲击治疗。

术后 2 周患者在支具保护下活动,佩戴支具保护 4~6 个月。对于脊髓、神经损伤的患者术后继续按标准冲击方案应用甲强龙,并给予神经营养药物、高压氧等治疗,辅助下肢末端电刺激,针灸理疗加强康复锻炼等治疗。

### 1.4 评价指标

根据患者术中是否出现神经电生理异常分为 IONM 异常组和 IONM 无异常组。采集所有患者指标包括:年龄、性别、BMI、既往脊柱手术史、术前 MRI 脊髓状况、术前 CT 椎管状况、术前主弯角度、Cobb 角>110°、柔韧度<10%、矫正率、截骨等级、手术时间、术中出血量。

### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 22.00 软件行数据统计分析, 计量数据以  $\bar{x} \pm s$  表示, 资料呈正态分布时, 两组间比较采用独立样本  $t$  检验; 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。等级资料两组比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验。以是否发生损伤的二分变量为因变量, 其他因素为自变量, 行二元多因素逻辑回归分析。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 临床结果

截骨矫形手术共 312 例, 术中共发生 IONM 异常 26 例, 占比 8.3%; 术后发生神经损伤 11 例, 占比 3.5%。IONM 异常组 11 例神经损伤中有 7 例术前影像学检查异常, 其中术前核磁脊髓异常 3 例, 术前 CT 椎管异常 4 例。26 例出现 IONM 监测异常的发生时间点分别是截骨 18 例、置钉 2 例、置棒 4 例、器械使用 2 例。其中 15 例患者术中经积极处理后 IONM 监测恢复正常, 术后未出现神经损伤并发症; 9 例术中经积极处理后 IONM 监测有较大改善, 术后有明显神经损伤并发症, 术后 6 个月随访时神经功能基本恢复; 2 例术中经积极处理后 IONM 改善较差, 术后神经并发症较重, 术后 24 个月随访时神经功能仅部分恢复。术中 IONM 无异常 286 例, 占比 91.7%; 术后发生神经损伤 1 例, 占比 0.3%。表现为一侧肢体麻木和肌力减弱, 术后 3 个月复查时恢复。术前行椎管内骨嵴切除手术、脊髓栓系切断术以及 Chiari 畸形行枕骨大孔扩大成形术的患者均未出现神经并发症。

### 2.2 是否 IONM 异常两组单项因素比较

根据患者术中是否出现神经电生理异常分为 IONM 异常组和 IONM 无异常组。两组患者单因素比较见表 1。IONM 异常组术前 MRI 脊髓异常占比、术前 CT 椎管异常占比、Cobb 角  $> 110^\circ$  占比、柔韧度  $< 10\%$  占比、截骨等级  $\geq 3$  级占比、手术时间显著高于 IONM 无异常组 ( $P < 0.05$ ), 两组年龄、性别、BMI、既往脊柱手术史、术前主弯角度、矫正率、术中出血量比较的差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 是否 IONM 异常的多因素逻辑回归分析

以是否 IONM 异常为因变量, 其他因素为自变量行二元多因素逻辑回归分析结果见表 2, 模型分类能力为 79.46%, 经卡方检验模型有效 ( $\chi^2 = 8.263, P = 0.002$ )。结果显示, 柔韧度  $< 10\%$  ( $OR = 9.824, P < 0.001$ )、术前 Cobb 角度大 ( $OR = 6.751, P = 0.004$ )、术

前 CT 椎管异常 ( $OR = 3.343, P = 0.017$ )、术前 MRI 脊髓异常 ( $OR = 3.117, P = 0.021$ )、手术截骨等级大 ( $OR = 2.897, P = 0.026$ ) 和手术时间长 ( $OR = 1.043, P = 0.031$ ) 是脊柱畸形截骨矫形术中发生 IONM 异常和神经损伤并发症的独立危险因素。

表 1. 是否 IONM 异常两组患者单因素比较  
Table 1 Univariate comparison between the abnormal IONM group and no abnormal IONM group

指标	IONM 异常组 (n=26)	IONM 无异常组 (n=286)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$ )	28.1 $\pm$ 12.7	24.5 $\pm$ 17.1	0.641
性别 (例, 男/女)	9/17	93/193	0.414
BMI (kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x} \pm s$ )	19.6 $\pm$ 4.8	22.1 $\pm$ 6.3	0.063
既往脊柱手术史 (例, 有/无)	9/17	20/266	0.218
术前 MRI 脊髓异常 (例, 有/无)	5/21	7/279	0.017
术前 CT 椎管异常 (例, 有/无)	8/18	25/261	0.029
术前主弯角度 ( $^\circ$ , $\bar{x} \pm s$ )	103.8 $\pm$ 20.7	93.6 $\pm$ 18.5	0.085
Cobb 角 $> 110^\circ$ [例 (%)]	19 (73.1)	31 (10.8)	0.011
柔韧度 $< 10\%$ [例 (%)]	20 (76.9)	29 (10.1)	$< 0.001$
矫正率 (%)	56.6 $\pm$ 6.2	66.4 $\pm$ 5.5	0.378
截骨等级 (例, $\leq 2/\geq 3$ )	4/22	193/93	0.005
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$ )	262.4 $\pm$ 27.3	215.6 $\pm$ 30.3	0.031
术中失血量 (ml, $\bar{x} \pm s$ )	712.2 $\pm$ 66.8	628.2 $\pm$ 58.6	0.415

## 3 讨论

脊柱畸形矫形手术难度高、风险大、并发症多, 已经成为脊柱矫形外科医生关注的主要问题<sup>[6]</sup>。研究表明, 神经损伤并发症主要的危险因素有: 患者脊柱畸形术前影像学检查<sup>[1]</sup>、脊柱畸形 Cobb 角<sup>[7, 8]</sup>、截骨等级和截骨部位<sup>[9, 10]</sup>、内固定器械和手术操作<sup>[11, 12]</sup>等。

本研究病例术中发生 IONM 异常 26 例, 神经损伤 11 例。研究表明, 术前脊髓、神经功能状况的评估非常重要; 术前患者存在神经症状多提示术前脊髓存在紧张牵拉、压迫、缺血等病变, 手术操作更容易加重脊髓损伤<sup>[1]</sup>; 术前 MRI 脊髓形态分型与严重胸椎侧后凸畸形患者三柱截骨矫形术神经并发症具有一定关联, 术前顶椎区 MRI 脊髓形态分型为 III 型的患者术后神经并发症的发生率更高<sup>[1]</sup>。术前 CT 三维重建和改良的手术技术可以最大限度地纠正脊柱畸形并预防神经并发症<sup>[13]</sup>。因此, 脊柱畸形患者术前影像学检查异常应引起高度重视, 应积极采取各种方法防止神经损伤的发生。

表 2. 是否 IONM 异常和神经损伤的多因素分析  
Table 2. Logistic regression analysis of multiple variables related to abnormal IONM and neurological damage after spinal deformity correction surgery

	$\beta$	S.E	Wald	OR	95% CI	P 值
Cobb 角大	1.771	0.219	9.757	6.751	1.309~12.377	0.004
柔韧度小	-2.623	1.025	7.359	9.824	1.061~15.312	<0.001
术前 MRI 脊髓异常	1.204	0.398	8.545	3.117	1.325~6.534	0.021
术前 CT 椎管异常	1.333	0.377	8.672	3.343	1.911~5.786	0.017
截骨等级	1.151	0.398	8.443	2.897	1.087~9.621	0.026
手术时间	-0.113	0.041	8.043	1.043	1.017~1.121	0.031

随着侧弯 Cobb 角增大，截骨矫形术中脊髓神经损伤的风险也随之加大。Qiu 等<sup>[2]</sup>研究发现，Cobb 角>90°神经损伤并发症发生率明显高于 Cobb 角<90°的患者。Lenke 等<sup>[14]</sup>的一组 35 例采用后路全脊椎切除截骨术治疗的儿童严重脊柱畸形患者中，Cobb>90°的患者中，3 例出现了神经并发症。Sarmiento<sup>[15]</sup>认为严重脊柱畸形（Cobb 角>100°）患者的神经系统并发症更高。本研究患者 IONM 异常组 26 例，Cobb 角>110°的患者 19 例（73.1%），11 例神经损伤患者 Cobb 角均>110°。IONM 无异常组，Cobb 角>110°的患者 31 例（10.8%），神经损伤 1 例，患者 Cobb 角为 140°，本研究结果也与上述结论一致。

本研究 IONM 异常组≤2 级截骨 4 例 IONM 异常，术后证实无神经损伤，≥3 级截骨 22 例发生 IONM 异常，术后证实 8 例神经损伤，其中 5 级截骨 2 例，6 级截骨 6 例，截骨等级越高神经损伤的发生率也越高。可能的原因有：截骨术中出血量大、硬膜囊缩短变形、截骨断端不稳定或移位、截骨不充分、截骨处残留骨块、脊柱侧弯截骨后于矫形时进行撑开或加压操作等。有报道后路全脊椎切除矫形术的术后并发症发生率高达 47%，远高于所有矫形手术严重并发症的发生率，研究表明，术中截骨及矫形手术与术后严重神经并发症的发生密切相关<sup>[16, 17]</sup>。Kawahara 等<sup>[18]</sup>研究证明，单节段脊柱短缩超过椎体高度 2/3 将使脊髓硬膜囊过度变形、血管扭曲导致缺血性损伤。所以，侧弯矫形术中，不必强求截骨端完全闭合。在矫形术中撑开或压缩时，要实时观察脊髓张力，避免脊髓过度牵拉或皱缩造成损伤。

本研究患者椎弓根螺钉置入过程中有 2 例 IONM 异常，经及时调整置钉后 IONM 恢复正常，未出现神经损伤，研究表明，虽有计算机导航、机器人等人工智能技术，但 X 线透视仍为常用方法，螺钉置入为三维过程，但 X 线透视为二维图像，加上腹腔脏器、肠管气体等影响，使 X 线透视判断螺钉是否于椎弓根内受到局限。Weinstein 等报道<sup>[19]</sup>，椎弓根螺

钉置入后 CT 扫描发现 21%螺钉穿破椎弓根皮质。脊柱侧弯患者解剖结构存在变异，椎体存在旋转，更增加了椎弓根螺钉置入的难度，同时也增加了脊髓损伤的风险。Bartley 等<sup>[20]</sup>报道 3 582 例前路或后路脊柱融合术患者并发症，其中神经损伤占 0.5%、肺部占 0.4%、器械相关占 0.4%。徐宝山等<sup>[21]</sup>报道手术治疗的 46 例脊柱畸形患者椎弓根螺钉侵入椎管 1 例，但没有发生神经症状。Kim 等<sup>[22]</sup>研究了 37 例接受了脊柱翻修后路脊柱内固定和融合术的患者，4 例（10.8%）出现暂时性神经系统并发症。

另外在本组手术置棒矫正过程中 4 例出现了 IONM 异常，经适当减少矫正角度，术后未发生神经症状，所以术中采用矫形技术时应注意观察 IONM 监测情况，避免神经损伤的发生。对于脊柱畸形椎管狭窄，椎板扩大应在可能的情况下配合使用磨钻、超声骨刀等动力器械，将骨质打薄后在使用薄型椎板咬骨钳去除椎板，扩大成形，在使用磨钻、超声骨刀等动力器械操作时，应小心谨慎、集中精力防止误操作。

本研究结果表明，术前 MRI 脊髓异常、术前 CT 椎管异常、Cobb 角>110°、柔韧度<10%、手术截骨等级大和手术时间长是脊柱畸形截骨矫形术中发生 IONM 异常和神经损伤并发症的危险因素。重视术前危险因素评估，术中仔细操作，应用 IONM 监测，手术中尽量降低截骨等级和缩短手术时间，可能是避免或减少脊柱畸形截骨矫形术神经损伤的有效方法。

### 参考文献

- [1] 史本龙, 刘万友, 李洋, 等. 术前磁共振不同脊髓形态分型脊柱畸形三柱截骨矫形术后神经并发症的发生情况 [J]. 中华医学杂志, 2022, 102 (5) : 344-349. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20210810-01782.
- Shi BL, Liu WY, Li Y, et al. Neurological complications after three-column osteotomy in spinal deformity patients with different magnetic resonance imaging-based classification of spinal cord shape [J]. National Medical Journal of China, 2022, 102 (5) : 344-349. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20210810-01782.

- [2] Qiu Y, Wang S, Wang B, et al. Incidence and risk factors of neurological deficits of surgical correction for scoliosis: analysis of 1373 cases at one Chinese institution [J]. *Spine*, 2008, 33 (5) : 519–526. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181657d93.
- [3] 张乐乐, 吴继功, 马华松, 等. 重度脊柱畸形翻修截骨术中神经监测变化的危险因素 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26 (11) : 977–982. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2018.11.04.  
Zhang LL, Wu JG, Ma HS, et al. Risk factors for neurological monitoring changes in spinal osteotomy of revision surgery for severe spinal deformity [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2018, 26 (11) : 977–982. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2018.11.04.
- [4] Kim HJ, Iyer S, Zebala LP, et al. Perioperative neurologic complications in adult spinal deformity surgery: incidence and risk factors in 564 patients [J]. *Spine*, 2017, 42 (6) : 420–427. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001774.
- [5] 张扬璞, 海涌, 孟祥龙, 等. 多节段后柱截骨术治疗僵硬性成人特发性脊柱侧凸疗效及影响因素分析 [J]. *中国骨与关节杂志*, 2022, 11 (7) : 492–497. DOI: 10.3969/j.issn.2095–252X.2022.07.003.  
Zhang YP, Hai Y, Meng XL, et al. Clinical outcome and influencing factors analysis of multi-level posterior column osteotomy in the treatment of rigid adult idiopathic scoliosis [J]. *Chinese Journal of Bone and Joint*, 2022, 11 (7) : 492–497. DOI: 10.3969/j.issn.2095–252X.2022.07.003.
- [6] 包利帅, 吴伟, 钟喜红, 等. 非顶椎截骨矫正陈旧性脊柱结核角状后凸 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (17) : 1613–1616. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2023.17.15.  
Bao LS, Wu W, Zhong XH, et al. Non-apex vertebral osteotomy for correction of angular kyphosis of old thoracolumbar tuberculosis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (17) : 1613–1616. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2023.17.15.
- [7] Boachie-Adjei O, Yagi M, Nemani VM, et al. Incidence and risk factors for major surgical complications in patients with complex spinal deformity: a report from an SRS GOP site [J]. *Spine Deform*, 2015, 3 (1) : 57–64. DOI: 10.1016/j.jspd.2014.06.008.
- [8] Xie JM, Zhang Y, Wang YS, et al. The risk factors of neurologic deficits of one-stage posterior vertebral column resection for patients with severe and rigid spinal deformities [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23 (1) : 149–156. DOI: 10.1007/s00586–013–2793–6.
- [9] Zhang H, Du Y, Zhao Y, et al. Outcomes of Ponte osteotomy combined with posterior lumbar interbody fusion for reconstruction of coronal and sagittal balance in degenerative scoliosis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18 (1) : 904–911. DOI: 10.1186/s13018–023–04371–7.
- [10] Bakhsheshian J, Hassan FM, Greisberg G, et al. The "Sandwich" extended pedicle subtraction osteotomy for the treatment of fixed sagittal malalignment: technical description, case series, and early results with 2-year outcomes [J/OL]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2023. DOI: 10.1227/ons.0000000000001016. Online ahead of print.
- [11] Hicks JM, Singla A, Shen FH, et al. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review [J]. *Spine*, 2010, 35 (11) : E465–470. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181d1021a.
- [12] Bartley CE, Yaszay B, Bastrom TP, et al. Perioperative and delayed major complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2017, 99 (14) : 1206–1212. DOI: 10.2106/JBJS.16.01331.
- [13] Han C, Hai Y, Yin P, Cha T, Li G, et al. In vivo deformation of the spine canal before and after surgical corrections of severe and rigid kyphoscoliosis [J]. *J Orthop Transl*, 2020, 23: 1–7. DOI: 10.1016/j.jot.2020.03.009.
- [14] Lenke LG, O'Leary PT, Bridwell KH, et al. Posterior vertebral column resection for severe pediatric deformity: minimum two-year follow-up of thirty-five consecutive patients [J]. *Spine*, 2009, 34 (20) : 2213–2221. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181b53cba.
- [15] Sarmiento JM, Rymond C, Concepcion-Gonzalez A, et al. Thoracic pediclectomy for acute spinal cord decompression in high-risk spinal deformity correction: illustrative case [J]. *J Neurosurg Case Lessons*, 2023, 6 (9) : CASE23312. DOI: 10.3171/CASE23312.
- [16] Suk SI, Kim JH, Kim WJ, et al. Posterior vertebral column resection for severe spinal deformities [J]. *Spine*, 2002, 27 (21) : 2374–2382. DOI: 10.1097/00007632–200211010–00012.
- [17] 赵会, 胡辰甫, 海涌. 脊柱畸形矫形术后严重并发症危险因素分析 [J]. *中华医学杂志*, 2016, 96 (23) : 1815–1817. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376–2491.2016.23.005.  
Zhao H, Hu CP, Hai Y. Risk factors of postoperative major complication after spine deformity surgery [J]. *National Medical Journal of China*, 2016, 96 (23) : 1815–1817. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376–2491.2016.23.005.
- [18] Kawahara N, Tomita K, Kobayashi T, et al. Influence of acute shortening on the spinal cord: an experimental study [J]. *Spine*, 2005, 30 (6) : 613–620. DOI: 10.1097/01.brs.0000155407.87439.a2.
- [19] Weinstein JN, Spratt KF, Spengler D, et al. Spinal pedicle fixation: reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful screw placement [J]. *Spine*, 1988, 13 (9) : 1012–1018. DOI: 10.1097/00007632–198809000–00008.
- [20] Bartley CE, Yaszay B, Bastrom TP, et al. Perioperative and delayed major complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2017, 99 (14) : 1206–1212. DOI: 10.2106/JBJS.16.01331.
- [21] 徐宝山, 马信龙, 张晓林, 等. 136 例脊柱畸形诊治中的失误与手术并发症分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22 (19) : 1744–1750. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2014.19.03.  
Xu BS, Ma XL, Zhang XL, et al. Analysis of pitfall and complication in the treatment of 136 spinal deformities [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2014, 22 (19) : 1744–1750. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2014.19.03.
- [22] Kim YW, Lenke LG, Kim YJ, et al. Free-hand pedicle screw placement during revision spinal surgery: analysis of 552 screws [J]. *Spine*, 2008, 33 (10) : 1141–1148. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31816f28a1.

(收稿:2024-01-20 修回:2024-05-28)

(同行评议专家:毛路, 武京国)

(本文编辑:郭秀婷)