

脊柱畸形矫形手术神经并发症的研究进展

Research progress of neurological complications in spinal deformity correction surgery

华文彬, 郜 勇, 杨 操

(华中科技大学同济医学院附属协和医院骨科 430022 武汉市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2023.07.11

中图分类号: R687.3, R619 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2023)-07-0651-06

脊柱畸形矫形手术难度高、风险大、并发症多。脊髓或神经损伤是脊柱矫形手术中最严重的并发症^[1]。神经并发症的分为轻度和重度,轻度神经并发症为颅神经或周围神经损伤;重度神经并发症为脊髓损伤,主要表现为双下肢全瘫、一侧或双侧下肢不全瘫^[2-3]。对于重度脊柱畸形矫形手术,特别是需要行三柱截骨,包括经椎弓根截骨(pedicle subtraction osteotomy, PSO)、全脊椎截骨术(vertebral column resection, VCR)等手术,术中神经并发症发生的风险高^[4-5]。本文对脊柱畸形矫形手术神经并发症的研究及脊柱畸形矫形手术新技术、新理念的应用等进行综述。

1 发生率

脊柱畸形矫形手术中,神经并发症的发生率约为 0.4%~6.3%^[1-3,5-8]。MacEwen 等^[9]报道,脊柱侧凸研究会(scoliosis research society, SRS)数据库中 7885 脊柱侧凸手术病例,神经并发症的发生率为 0.72%。Coe 等^[10]报道, SRS 数据库中 6334 例特发性脊柱侧凸手术病例,前路、后路和前后联合入路手术的神经并发症发生率分别为 0.26%、0.32% 和 1.75%。Qiu 等^[11]回顾性分析 1373 例脊柱侧凸矫形手术,神经并发症的发生率为 1.89%。Li 等^[12]回顾性分析 8870 例脊柱侧凸矫形手术,神经并发症的发生率为 0.73%。

2 发生原因

脊柱畸形矫形手术神经并发症发生的主要原因为机械性损伤和缺血性损伤。机械性损伤包括内置入物引起的脊髓压迫、术中操作引起的机械性损伤和术后血肿引起的脊髓压迫等;缺血性损伤主要是术中脊髓灌注不足引起的缺血性损伤^[9]。

2.1 椎弓根螺钉置钉

第一作者简介:男(1987-),医学博士,副主任医师,副教授,研究方向:脊柱外科

电话:(027)85351626 E-mail:huawb1987@163.com

通信作者:杨操 E-mail:yangcao1971@sina.com

椎弓根螺钉置钉是脊柱畸形矫形手术的基本技术,置钉失误可能引起神经并发症。Kim 等^[13]报道脊柱畸形矫形术中椎弓根螺钉徒手置钉失误的发生率为 6.2%(36/577)。Hicks 等^[10]报道脊柱畸形矫形术中椎弓根螺钉置钉失误的发生率为 4.2%(518/12248),神经并发症发生率为 0.06%(1/1666)。脊柱畸形手术中,胸椎椎弓根螺钉置钉失误的发生率为 3%~44.2%,而置钉失误引起神经并发症的发生率为 0%~0.9%^[9,11,12]。Bartley 等^[13]报道,椎弓根螺钉置钉失误相关神经并发症的发生率为 0.17%。

2.2 截骨操作

2.2.1 截骨部位 Suk 等^[14]报道后路 VCR 治疗 70 例重度脊柱畸形,2 例发生完全性脊髓损伤,截骨节段均为胸椎。Lenke 等^[10]报告后路 VCR 矫治 43 例严重脊柱畸形,胸段的神经并发症发生率 18.6%,腰段神经并发症发生率为 9.3%。Xie 等^[15]认为主弯顶椎位于胸椎是后路 VCR 矫形手术神经并发症的危险因素。胸椎截骨的神经并发症发生风险高于腰椎截骨^[14-16]。

2.2.2 截骨等级 根据截骨范围, Schwab 等将脊椎截骨术分为 1~6 级,分别为 Smith-Petersen 截骨(1 级截骨)、Ponte 截骨(2 级截骨)、PSO(3 级截骨)、经椎弓根楔形截骨(PSO+椎间盘切除,4 级截骨)、VCR(5 级截骨)和多节段 VCR(6 级截骨)^[17]。根据脊柱畸形的严重程度需要施行不同的截骨方式。截骨范围越大,神经并发症的风险越高。

Ghobrial 等^[18]报道多节段 2 级截骨治疗 85 例成人脊柱畸形,未见神经并发症。Lau 等^[19]报道腰椎 PSO 治疗 242 例成人脊柱畸形,38 例(15.7%)术中发生术中神经电生理监测(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)异常事件。Daubs 等^[20]报道 PSO 治疗 65 例脊柱畸形,4 例(6.2%)发生神经并发症。Shi 等^[21]报道 4 级截骨治疗 38 例先天性胸腰椎侧后凸畸形,1 例(2.6%)发生神经并发症。Hua 等^[22]报道 4 级截骨治疗 26 例重度僵硬型胸椎侧后凸畸形,6 例(23.1%)发生 IONM 异常事件,1 例(3.8%)发生神经并发症。Lenke 等^[23]报告后路 VCR 治疗的 35 例重度儿童脊柱畸形,单节段截骨 20 例,多节段截骨 15 例,其中单节段截骨 2 例(10%)发生神经并发症,多节段截骨 2 例

(13.3%)发生神经并发症。Shi 等^[24]报道多节段后路 VCR 治疗 17 例重度先天性角状侧后凸畸形,4 例(23.5%)发生 IONM 异常事件,其中 3 例(17.6%)发生神经并发症。

2.3 矫形操作

矫形过程中截骨端移位、脊髓过度短缩、脊髓褶皱、硬膜外压迫等是引起神经并发症的最常见原因^[5,16,23,25]。Lenke 等^[16]报告 43 例后路 VCR 病例,7 例(16.3%)术中出现 IONM 异常事件,其中 5 例截骨端移位,2 例脊髓过度短缩,1 例硬膜外压迫。Hamzaoglu 等^[25]报告 102 例后路 VCR 病例,6 例术中出现 IONM 异常事件,4 例截骨端移位,2 例椎板压迫。Li 等^[5]报道,8870 例脊柱侧凸矫形手术病例中,共有 17 例脊髓损伤与术中脊髓过度撑开有关,11 例脊髓损伤与术中脊髓过度短缩有关。

2.4 术中脊髓灌注不足

术中平均动脉压波动较大或持续低于 75mmHg,引起脊柱灌注不足,可能增加术中 IONM 异常事件和神经并发症的发生风险^[16,23,26]。Lenke 等^[16,23]认为在矫形和闭合截骨面的过程中,保持正常的血压非常重要,平均动脉压最好保持在 75~80mmHg。Yang 等^[26]报道 30 例 IONM 异常事件,平均动脉压为 75mmHg 以下,将平均动脉压提高至 85mmHg 以上后,6 例(20%)IONM 信号完全恢复,60%的病例 IONM 信号部分恢复。Li 等^[5]报道,5 例脊柱侧凸矫形手术术中脊髓损伤与脊髓缺血有关,其中 3 例发生术中出血过多,2 例行节段血管结扎。

3 危险因素

对于严重的脊柱畸形,包括先天性脊柱畸形、重度脊柱侧凸、角状后凸、重度后凸、脊柱侧后凸畸形、感染后脊柱后凸畸形、合并神经症状的脊柱畸形、联合入路手术、翻修手术等,术中神经并发症发生的风险更高^[4,5]。

3.1 先天性脊柱畸形

先天性脊柱畸形患者,矫形手术的神经并发症发生风险更高。Xie 等^[15]认为合并脊髓和脑干畸形可能是神经并发症的危险因素,包括 Chiari 畸形、脊髓空洞症和脊髓拴系综合征等。由于脊柱畸形引起脊髓慢性缺血缺氧,而矫形过程中脊髓进一步牵拉受压可能加重脊髓缺血。Qiu 等^[11]回顾性分析 1373 例脊柱侧凸矫形手术病例,特发性脊柱侧凸患者的神经并发症发生率为 1.1%,而先天性脊柱侧凸患者的神经并发症发生率为 2.89%,存在显著性差异。Zeng 等^[27]报道后路三柱截骨治疗 23 例先天性脊柱畸形,9 例行 PSO,14 例行 VCR,2 例(8.7%)发生神经并发症。Wang 等^[28]报道后路 VCR 治疗 24 例先天性角状后凸畸形,2 例(8.3%)发生神经并发症。Shi 等^[24]报道 4 级截骨治疗 38 例先天性胸腰椎侧后凸畸形,1 例(2.6%)发生神经并发症。Shi 等^[24]报道多节段后路 VCR 治疗 17 例重度先天性角状侧后凸畸形,4 例(23.5%)发生 IONM 异常事件,其中 3 例(17.6%)发生神经并发症。

3.2 重度脊柱侧凸

脊柱侧凸 Cobb 角>90°的脊柱畸形患者,矫形手术的神经并发症发生风险更高。Qiu 等^[11]回顾性分析了 1373 例脊柱侧凸矫形手术病例,脊柱侧凸 Cobb 角<90°的病例神经并发症的发生率为 1.45%,而脊柱侧凸 Cobb 角>90°的病例神经并发症的发生率为 3.69%,存在显著性差异。Xie 等^[15]报道 76 例重度僵硬型脊柱畸形,共有 6 例(7.9%)发生神经并发症。

3.3 角状后凸、重度后凸及侧后凸畸形

角状后凸畸形、重度后凸畸形、侧后凸畸形都是矫形难度较大的重度脊柱畸形,矫形手术的神经并发症发生风险更高。Lenke 等^[16]报道 43 例后路 VCR 病例,7 例(16.3%)术中出现 IONM 异常事件,7 例患者均伴有后凸畸形,其中 2 例为角状后凸畸形,4 例为侧后凸畸形。Wang 等^[28]报道后路 VCR 治疗 24 例先天性角状后凸畸形,2 例(8.3%)发生神经并发症。Hua 等^[29]报道 4 级截骨治疗 26 例重度僵硬型脊柱胸椎侧后凸畸形,6 例(23.1%)发生 IONM 异常事件,1 例(3.8%)发生神经并发症。Shi 等^[24]报道 4 级截骨治疗 38 例先天性胸腰椎侧后凸畸形,1 例(2.6%)发生神经并发症。Shi 等^[24]报道多节段后路 VCR 治疗 17 例重度先天性角状侧后凸畸形,4 例(23.5%)发生 IONM 异常事件,其中 3 例(17.6%)发生神经并发症。

3.4 感染后脊柱后凸畸形

感染后脊柱后凸畸形患者,由于感染后纤维瘢痕组织增生、严重角状后凸畸形、脊髓牵拉或压迫,矫形手术的神经并发症发生风险高^[29]。Suk 等^[14]报道后路 VCR 治疗 70 例重度脊柱畸形患者,25 例为感染后脊柱后凸畸形患者,其中 3 例(12%)发生神经并发症。Wang 等^[30]报道后路 VCR 治疗 9 例严重结核性后凸畸形,其中 1 例术前合并神经症状,发生不全瘫,神经并发症发生率为 11.1%。Zeng 等^[31]报道后路 VCR 治疗 29 例严重结核性后凸畸形,1 例(3.4%)术后出现不全瘫症状。Hua 等^[29]报道后路 VCR 治疗 13 例术前伴神经症状的结核性后凸畸形,5 例(38.5%)发生 IONM 异常事件,2 例(15.4%)发生神经并发症。

3.5 术前合并神经症状

术前存在神经症状的脊柱畸形患者,矫形手术的神经并发症发生风险更高。Suk 等^[14]报道采用后路 VCR 治疗的 70 例重度脊柱畸形,2 例患者发生完全性脊髓损伤,术前神经功能均为 Frankel D 级,术后为 Frankel A 级。Xie 等^[15]报道 76 例重度僵硬型脊柱畸形,共有 6 例(7.9%)发生神经并发症,其中 5 例术前合并神经症状。Wang 等^[30]报道后路 VCR 治疗 9 例严重结核性后凸畸形,其中 1 例术前合并神经症状(AISA D 级),发生不全瘫(AISA B 级),神经并发症发生率为 11.1%,术后随访神经功能恢复。Rajasekaran 等^[32]报道后路 VCR 治疗 17 例结核性后凸畸形,5 例术前合并神经症状,其中 1 例发生完全性脊髓损伤,术前神经功能为 Frankel C 级,术后为 Frankel A 级。Hua 等^[29]报道后路 VCR 治疗 13 例术前伴神经症状的结核性后凸畸形,5 例(38.5%)发生 IONM 异常事件,2 例

(15.4%)发生神经并发症。

3.6 需要行前后联合入路手术的脊柱畸形

Coe 等^[8]报道, SRS 数据库中 6334 例特发性脊柱侧凸病例, 前路、后路和前后联合入路手术的神经并发症发生率分别为 0.26%、0.32% 和 1.75%。Qiu 等^[1]回顾性分析 1373 例脊柱侧凸矫形手术病例, 前路、后路和前后联合入路手术的神经并发症发生率分别为 0.54%、0.64% 和 3.85%。

3.7 脊柱畸形矫形翻修手术

翻修手术中暴露困难、解剖结构改变, 可能增加术中神经并发症的发生风险。Qiu 等^[1]回顾性分析 1373 例脊柱侧凸矫形手术病例, 初次手术的神经并发症发生率为 1.68%, 而翻修手术的神经并发症发生率为 5.97%, 存在显著性差异。Lenke 等^[23]报告后路 VCR 治疗的 35 例重度儿童脊柱畸形, 15 例行多节段截骨, 其中 2 例 (13.3%) 发生神经并发症, 均为翻修手术。

3.8 成人脊柱畸形

随着患者手术年龄的增大, 神经并发症的发生风险增加。Kim 等^[33]对 26 例先天性胸腰椎后凸、侧后凸患者的矫形疗效进行分析, 发现年龄与神经损害存在正相关。Qiu 等^[1]报道对于特发性脊柱侧凸、先天性脊柱侧凸、神经肌肉型脊柱侧凸、多发性神经纤维瘤病合并脊柱侧凸等进行脊柱侧凸矫形时, 18 岁以下接受手术与 18 岁以上的神经并发症发生风险并无显著性差异。

4 预防和处理

4.1 术中神经电生理监测

IONM 包括综合应用体感诱发电位 (somatosensory evoked potentials, SEP)、经颅电刺激躯体运动诱发电位 (transcranial electric motor evoked potentials, TcMEP) 和肌电图 (electromyogram, EMG) 等, 在脊柱外科手术神经系统并发症的预防中起着不可替代的作用。多模式 IONM 可以最大限度地降低术中监测的假阳性率和假阴性率, 提高监测的敏感性和特异性^[6, 34]。

IONM 异常事件报警处理原则: 一旦发生 IONM 异常事件, 应仔细检查下列方面, 包括环境因素 (排除外在刺激因素)、麻醉及生理学因素 (动脉压、红细胞压积)、技术因素 (麻醉状态、电极连接) 和潜在的手术刺激因素。若排除环境因素、麻醉及生理学因素、技术因素等问题后, 或唤醒试验阳性时, 则提醒手术者尽快松开或去除内固定、必要时行脊髓扩大减压, 同时予以脱水剂、激素等进行神经保护治疗, 直至神经电生理监测好转^[4, 15]。

4.2 椎弓根螺钉置钉过程中神经并发症的预防和处理

熟练掌握并应用徒手椎弓根螺钉置钉技术是预防椎弓根螺钉置钉过程中神经并发症的基本要求^[9]。多种影像引导技术, 包括计算机导航、手术机器人辅助置钉等, 有助于提高椎弓根螺钉置钉的准确率^[12, 35-37]。

术中置钉过程中, 一旦发生 IONM 异常事件, 若排除

机械因素和麻醉因素等, 可能需及时检查可疑的椎弓根螺钉, 必要时需取出可疑的椎弓根螺钉。Li 等^[9]报道 7 例脊柱侧凸矫形患者因为椎弓根螺钉误置发生脊髓损伤, 其中 6 例术中出现 IONM 异常事件, 均予以取出误置的椎弓根螺钉。

4.3 截骨过程中神经并发症的预防和处理

截骨过程中一旦发现 IONM 异常事件, 应立即停止操作, 按上述顺序仔细检查。通常应予以扩容升压后, 必要时需松开或去除部分内固定、扩大椎板减压。采用 Ponte 截骨时, 需要充分切除椎板, 尤其对于重度僵硬性脊柱畸形的顶椎区, 椎板减压的范围需扩大至椎弓根之间。采用三柱截骨时, 截骨端闭合前需要充分椎板减压, 特别是行 VCR 时, 建议将椎板减压范围向截骨近端和远端分别延长一个节段, 以免矫形过程中截骨端移位, 脊髓过度短缩, 硬膜外压迫^[16, 25]。

4.4 矫形过程中神经并发症的预防和处理

4.4.1 矫形过程中神经并发症的预防策略 (1) 截骨端扩大椎板减压范围, 保证充分减压进行矫形操作时, 如截骨端加压闭合及原位弯棒等, 需反复确认 IONM 信号^[25]。Li 等^[9]报道 8870 例脊柱侧凸矫形手术患者中, 17 例术中因脊髓过度撑开, 11 例因脊髓过度短缩导致脊髓损伤, 予以及时松开内固定、椎板扩大减压后, 22 例脊髓功能完全恢复, 5 例脊髓功能部分恢复。

(2) 临时固定棒渐进矫形 三柱截骨时, 截骨端需要采用双侧临时固定棒固定^[14, 22, 25, 29]。通常应用双侧临时固定棒交替塑形、原位弯棒技术及手术床调节等技术, 实现截骨端的逐步闭合和矫形, 并随时观察有无硬膜囊受压, 脊髓张力过大、脊髓皱缩及过度短缩、截骨端错位压迫脊髓等情况^[5, 14, 22, 25, 29]。完成矫形操作后, 分别将双侧临时固定棒更换为全长固定棒并锁紧。

(3) 截骨间隙钛网支撑, 防止脊髓过度短缩 采用 VCR 矫形时, 截骨端椎体前柱之间通常需要放置钛网支撑, 防止脊髓过度短缩和脊髓褶皱^[14, 25, 32]。

(4) 脊柱畸形顶椎邻近节段椎管狭窄需要先行椎管减压 部分角状后凸患者顶椎邻近节段合并椎管狭窄, 矫形操作前需要先行椎管减压。Chen 等^[38]报道 6 例胸椎结核性后凸畸形患者合并黄韧带钙化, 可能是由于局部脊柱不稳或局部应力过大反复刺激所致。Ha 等^[39]报道结核性角状后凸畸形合并神经症状的患者中发现了 4 例黄韧带钙化、4 例椎管狭窄、2 例椎间盘突出及 1 例节段性不稳。Hua 等^[20]报道 5 例结核性后凸畸形患者顶椎邻近节段合并椎管狭窄, 术中先行邻近节段椎管减压, 再行截骨端矫形闭合, 可降低矫形过程中神经并发症的发生风险。

4.4.2 矫形术中发生神经并发症的处理策略 术中发生神经并发症的处理策略主要包括: 取出误置的椎弓根螺钉、松开内固定、扩大椎板减压, 避免脊髓过度撑开或过度短缩等。Li 等^[9]报道, 6 例脊柱侧凸矫形患者因为椎弓根螺钉误置导致术中出现 IONM 异常事件, 予以及时取出误置

的椎弓根螺钉。Lenke 等^[16]报告 43 例后路 VCR 病例,7 例(16.3%)矫形过程中出现 IONM 异常,通过松开内固定、扩大椎板减压、去除压迫后,2 例术后存在神经并发症,随访完全恢复。Hamzaoglu 等^[25]报告 102 例后路 VCR 病例,6 例矫形过程中出现 IONM 变化,其中 4 例为截骨端移位,予以矫正移位,2 例为脊髓受压,予以椎板扩大减压后 IONM 信号改善,术后未见神经并发症。Li 等^[9]报道脊柱侧凸矫形手术患者中,17 例因脊髓过度撑开,11 例因脊髓过度短缩导致脊髓损伤,予以及时松开内固定、椎板扩大减压后,22 例脊髓功能完全恢复,5 例脊髓功能部分恢复。

4.4.3 术后发生神经并发症的处理策略 术后神经并发症的发生原因主要包括:椎弓根螺钉位置异常、术后血肿形成、迟发性脊髓神经损伤等^[9]。对于椎弓根螺钉位置异常,可行翻修手术取出误置的螺钉或重新置钉;对于术后血肿形成,需要行翻修手术清创血肿;围手术期需要密切观察,尽早发现并积极治疗迟发性脊髓神经损伤^[9]。Bartley 等^[13]报道 3582 例青少年特发性脊柱侧凸患者,术后围手术期神经并发症发生率为 0.53%;迟发性神经并发症发生率为 0.14%,包括 3 例椎弓根螺钉移位引起的神经根损伤或根性疼痛,需要再次手术取出内固定。

5 脊柱畸形矫形手术新技术及新理念的应用

近年来,计算机导航辅助置钉、机器人辅助置钉、3D 打印导板辅助置钉等新技术及新理念的出现,进一步提高了脊柱侧凸矫形手术中椎弓根螺钉置钉的精准度,减少了术中椎弓根螺钉置钉失误引起的神经并发症。

5.1 计算机导航辅助置钉在脊柱畸形矫形手术中的应用

Su 等^[35]报道,20 例特发性脊柱侧凸行矫形手术,随机分为徒手置钉组和计算机辅助导航下置钉组,徒手置钉凸侧、凹侧准确率分别为 88.2%和 84.5%,计算机辅助导航下置钉的凸侧和凹侧准确率分别 94.1%和 94.0%。Kaur 等^[37]报道,8640 例特发性脊柱侧凸行矫形手术,其中 467 例行计算机辅助导航下置钉,其余采用传统徒手置钉,计算机辅助导航组的术后 90d 总并发症发生率较低,但两组神经并发症发生率无显著差异。

5.2 机器人辅助置钉在脊柱畸形矫形手术中的应用

Chen 等^[40]报道了 97 例成人退变性脊柱侧凸矫形手术,66 例行徒手置钉,31 例行机器人辅助置钉,徒手置钉的准确率为 92.2%,机器人辅助置钉的准确率为 98.7%。

5.3 3D 打印导板辅助置钉在脊柱畸形矫形手术中的应用

Liu 等^[41]在重度僵硬性脊柱侧凸矫形手术中采用 3D 打印导板辅助置钉,徒手置钉 104 枚,机器人辅助置钉 48 枚,徒手置钉的准确率为 78.8%,机器人辅助置钉的准确率为 93.8%。Tu 等^[42]分析 24 例先天性脊柱侧凸矫形手术,13 例采用徒手置钉,11 例采用 3D 打印导板辅助置钉,徒手置钉的准确率为 82.76%,而 3D 打印导板辅助置钉的准确率为 95.56%。

综上所述,脊柱畸形矫形手术中神经并发症的神经

并发症发生的风险相对较高^[4],术前需要明确高危因素,提高椎弓根螺钉置钉的精准度,如借助计算机导航辅助置钉、机器人辅助置钉、3D 打印导板辅助置钉等新技术,选取合适的截骨矫形方式,注意矫形操作过程中的处理策略,并维持术中脊髓血流灌注,以降低术中神经并发症的发生风险。

6 参考文献

1. 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(Phila Pa 1976), 2008, 33(5): 519-526.
2. Bridwell KH, Lenke LG, Baldus C, et al. Major intraoperative neurologic deficits in pediatric and adult spinal deformity patients: incidence and etiology at one institution[J]. Spine(Phila Pa 1976), 1998, 23(3): 324-331.
3. MacEwen GD, Bunnell WP, Sriram K. Acute neurological complications in the treatment of scoliosis: a report of the scoliosis research society[J]. J Bone Joint Surg Am, 1975, 57(3): 404-408.
4. Pastorelli F, Di Silvestre M, Plasmati R, et al. The prevention of neural complications in the surgical treatment of scoliosis: the role of the neurophysiological intraoperative monitoring [J]. Eur Spine J, 2011, 20(Suppl 1): S105-114.
5. Li J, Hu Z, Qian Z, et al. The prognosis and recovery of major postoperative neurological deficits after corrective surgery for scoliosis: an analysis of 65 cases at a single institution[J]. Bone Joint J, 2022, 104-b(1): 103-111.
6. Schwartz DM, Auerbach JD, Dormans JP, et al. Neurophysiological detection of impending spinal cord injury during scoliosis surgery[J]. J Bone Joint Surg Am, 2007, 89(11): 2440-2449.
7. Bhagat S, Durst A, Grover H, et al. An evaluation of multimodal spinal cord monitoring in scoliosis surgery: a single centre experience of 354 operations[J]. Eur Spine J, 2015, 24(7): 1399-1407.
8. Coe JD, Arlet V, Donaldson W, et al. Complications in spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis in the new millennium: a report of the scoliosis research society morbidity and mortality committee[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2006, 31(3): 345-349.
9. Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe [J]. Spine(Phila Pa 1976), 2004, 29(3): 333-342.
10. 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.
11. 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.
12. Youkilis AS, Quint DJ, McGillicuddy JE, et al. Stereotactic

- navigation for placement of pedicle screws in the thoracic spine[J]. *Neurosurgery*, 2001, 48(4): 771-779.
13. 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.
 14. Suk SI, Kim JH, Kim WJ, et al. Posterior vertebral column resection for severe spinal deformities [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27(21): 2374-2382.
 15. 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.
 16. Lenke LG, Sides BA, Koester LA, et al. Vertebral column resection for the treatment of severe spinal deformity[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468(3): 687-699.
 17. Schwab F, Blondel B, Chay E, et al. The comprehensive anatomical spinal osteotomy classification [J]. *Neurosurgery*, 2014, 74(1): 112-120.
 18. Ghobrial GM, Lebowitz NH, Green BA, et al. Multilevel schwab grade ii osteotomies for sagittal plane correction in the management of adult spinal deformity[J]. *Spine J*, 2017, 17(11): 1594-1600.
 19. Lau D, Dalle Ore CL, Reid P, et al. Utility of neuromonitoring during lumbar pedicle subtraction osteotomy for adult spinal deformity[J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 31(3): 397-407.
 20. Daubs MD, Brodke DS, Annis P, et al. Perioperative complications of pedicle subtraction osteotomy[J]. *Global Spine J*, 2016, 6(7): 630-635.
 21. Shi B, Zhao Q, Xu L, et al. Srs-schwab grade 4 osteotomy for congenital thoracolumbar kyphosis: a minimum of 2 years follow-up study[J]. *Spine J*, 2018, 18(11): 2059-2064.
 22. Hua W, Zhang Y, Wu X, et al. Transpedicular wedge resection osteotomy of the apical vertebrae for the treatment of severe and rigid thoracic kyphoscoliosis: a retrospective study of 26 cases[J]. *Spine Deform*, 2019, 7(2): 338-345.
 23. 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(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(20): 2213-2221.
 24. Shi B, Shi B, Liu D, et al. Scoliosis research society-schwab grade 6 osteotomy for severe congenital angular kyphoscoliosis: an analysis of 17 cases with a minimum 2-year follow-up[J]. *Neurosurgery*, 2020, 87(5): 925-930.
 25. Hamzaoglu A, Alanay A, Ozturk C, et al. Posterior vertebral column resection in severe spinal deformities: a total of 102 cases[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(5): E340-344.
 26. Yang J, Skaggs DL, Chan P, et al. Raising mean arterial pressure alone restores 20% of intraoperative neuromonitoring losses[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2018, 43(13): 890-894.
 27. Zeng Y, Chen Z, Qi Q, et al. The posterior surgical correction of congenital kyphosis and kyphoscoliosis: 23 cases with minimum 2 years follow-up[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(2): 372-378.
 28. Wang S, Aikenmu K, Zhang J, et al. The aim of this retrospective study is to evaluate the efficacy and safety of posterior-only vertebral column resection (pvcr) for the treatment of angular and isolated congenital kyphosis [J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(7): 1817-1825.
 29. Hua W, Wu X, Zhang Y, et al. Incidence and risk factors of neurological complications during posterior vertebral column resection to correct severe post-tubercular kyphosis with late-onset neurological deficits: case series and review of the literature[J]. *J Orthop Surg Res*, 2018, 13(1): 269.
 30. Wang Y, Zhang Y, Zhang X, et al. Posterior-only multilevel modified vertebral column resection for extremely severe pott's kyphotic deformity [J]. *Eur Spine J*, 2009, 18 (10): 1436-1441.
 31. Zeng Y, Chen Z, Qi Q, et al. Clinical and radiographic evaluation of posterior surgical correction for the treatment of moderate to severe post-tuberculosis kyphosis in 36 cases with a minimum 2-year follow-up [J]. *J Neurosurg Spine*, 2012, 16(4): 351-358.
 32. Rajasekaran S, Vijay K, Shetty AP. Single-stage closing-opening wedge osteotomy of spine to correct severe post-tubercular kyphotic deformities of the spine: a 3-year follow-up of 17 patients[J]. *Eur Spine J*, 2010, 19(4): 583-592.
 33. Kim YJ, Otsuka NY, Flynn JM, et al. Surgical treatment of congenital kyphosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2001, 26(20): 2251-2257.
 34. El-Hawary R, Sucato DJ, Sparagana S, et al. Spinal cord monitoring in patients with spinal deformity and neural axis abnormalities: a comparison with adolescent idiopathic scoliosis patients[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2006, 31(19): E698-706.
 35. Su P, Zhang W, Peng Y, et al. Use of computed tomographic reconstruction to establish the ideal entry point for pedicle screws in idiopathic scoliosis[J]. *Eur Spine J*, 2012, 21 (1): 23-30.
 36. Cawley DT, Rajamani V, Cawley M, et al. Using lean principles to introduce intraoperative navigation for scoliosis surgery[J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-b(1): 5-10.
 37. 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.
 38. Chen Y, Lu XH, Yang LL, et al. Ossification of ligamentum flavum related to thoracic kyphosis after tuberculosis: Case report and review of the literature[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(1): E41-44.
 39. Ha KY, Kim YH. Late onset of progressive neurological

综述

基于人工智能的特发性脊柱侧凸检测与诊断技术进展

Progress in detection and diagnosis of idiopathic scoliosis based on artificial intelligence

甘治航¹,王首占¹,梁彦²,郭辰²,刘海鹰²,徐帅²

(1 北京大学医学部 100731 北京市;2 北京大学人民医院脊柱外科 100044 北京市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2023.07.12

中图分类号:R682.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2023)-07-0656-06

特发性脊柱侧凸(idiopathic scoliosis, IS)是一种三维脊柱畸形,根据患者的发病年龄分为婴幼儿型(出生~2岁)、儿童型(3~9岁)和青少年型(10岁及以上),是导致脊柱畸形最为常见的儿童青少年骨骼肌肉系统疾病^[1]。由于IS在身体发育较为迅速的阶段(青少年期)更易出现,因此青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)是临床中最常见的脊柱畸形,约占所有脊柱侧凸患病率的80%~90%,且女性患病率约为男性的1.3~1.9倍^[2-4]。在青春期阶段,尽管轻中度的AIS患者(Cobb角10°~40°)似乎并无严重影响生活的临床症状,但有文献报道患者在成年后生活质量明显下降,易受到肺功能障碍、椎间盘和小关节退变加速、背部疼痛甚至残疾等不良结局的影响^[5]。当侧凸程度加重后患者可能需要接受手术治疗,对患者本身和家庭造成严重的经济负担,因此在早期对脊柱侧凸进行筛查和非手术干预具有重要的临床价值^[6]。目前我国儿童青少年脊柱侧凸患者预估已超过500万人,AIS已成为继肥胖、近视之后威胁我国儿童青少年身心健康的第三大

疾病^[7];一项纳入超200万中小学生的横断面调查发现,我国儿童青少年脊柱侧凸患病率在近年来有抬头趋势^[8]。近年来国家高度重视青少年脊柱侧凸的监测工作,并将AIS防控上升为国家卫生工作的战略任务,因此对中小学生的脊柱侧凸进行快速准确地检测具有重要意义。

既往国内外关于AIS筛查工作主要包括学校初筛、二筛和医院三筛三个步骤,其中三筛是通过脊柱正侧位X线片对青少年有无AIS进行判断,是目前国际上诊断是否存在脊柱侧凸的金标准(Cobb角>10°)。通常初步筛查和院内三筛的流程和监测手段相对比较成熟,而对于二筛的检测手段始终无法统一。目前脊柱侧凸的初步检测方式包括常规体格检查、Adams试验、重力锤、云纹成像法等,尽管在临床中仍然被广泛应用,但存在着测量误差大、敏感度低、检测时间长、人力成本高以及对人体造辐射损伤等不足。当前,随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的发展和AI技术在医学领域的应用,一些基于AI的符合国际标准的脊柱侧凸筛查和评估设备逐步问世,部分产品已成功应用于中小学生常规脊柱体检。基于AI的脊柱侧凸检测可以快速省力、准确便捷、安全无损地对侧凸情况进行准确评估,具有传统检测方式不可比拟的巨大优势。

笔者将对脊柱侧凸的诊断手段进行简要的回顾,分析各种方法的优缺点。着重阐述一系列基于AI的脊柱侧凸检测方法的基本原理和临床应用。通过对各种检测方法的归纳,希望能为中小学生乃至全人群脊柱侧凸的快速筛查和诊疗评估提供一些帮助,为国家的脊柱侧凸监测提供

基金项目:北京大学人民医院研究与发展基金(RDY2021-12);北京大学人民医院研究与发展基金(RDL2022-52);北京市自然科学基金(7232182)

第一作者简介:男(2001-),临床医学(八年制)本科生在读,研究方向:骨科

电话:(010)88324110 E-mail:2010301328@stu.pku.edu.cn

共同第一作者:王首占 E-mail:2010301319@stu.pku.edu.cn

通讯作者:徐帅 E-mail:xushuairmyy@pku.edu.cn

deficits in severe angular kyphosis related to tuberculosis spondylitis[J]. Eur Spine J, 2016, 25(4): 1039-1046.

40. Chen X, Feng F, Yu X, et al. Robot-assisted orthopedic surgery in the treatment of adult degenerative scoliosis: a preliminary clinical report[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 282.

41. Liu K, Zhang Q, Li X, et al. Preliminary application of a multi-level 3d printing drill guide template for pedicle

screw placement in severe and rigid scoliosis [J]. Eur Spine J, 2017, 26(6): 1684-1689.

42. Tu Q, Chen H, Ding HW, et al. Three-dimensional printing technology for surgical correction of congenital scoliosis caused by hemivertebrae[J]. World Neurosurg, 2021, 149: e969-e981.

(收稿日期:2022-04-18 修回日期:2022-06-20)

(本文编辑 姜雅浩)