

综述

重度脊柱畸形矫形手术中脊髓/神经损伤并发症
危险因素及预防的研究进展Research progress of the risk factors and prevention of spinal cord/nerve
injury during corrective surgery for severe spinal deformity

倪佳俊,袁磊,曾岩,刘寅昊,张家豪,李危石

(北京大学第三医院骨科 骨与关节精准医学工程研究中心 脊柱疾病研究北京市重点实验室 100191 北京市)

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2022.04.13

中图分类号:R682.3,R619 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2022)-04-0374-05

脊柱畸形对患者的健康相关生活质量(health-related quality of life,HRQOL)有很大影响,患者可出现外观异常、疼痛、神经系统症状及畸形导致的心理健康问题^[1]。对于严重脊柱畸形患者,手术治疗被认为是一种有效方法。但脊柱畸形外科治疗的并发症发生率较高,其中脊髓或神经损伤是患者和外科医生最关心的问题之一^[2]。近年来,国内外学者针对脊柱畸形矫形术中脊髓或神经损伤已做了大量的研究,但并未获得统一结论。笔者通过回顾文献,对目前重度脊柱畸形矫形术中脊髓或神经损伤的相关研究进展进行综述。

1 脊髓或神经损伤的发生率

由于不同研究的设计方法、研究对象、队列大小、随访时间、手术方式、并发症定义存在较大差异,文献中报道的脊髓或神经损伤的发生率差异也较大。

与前瞻性研究相比,脊柱畸形矫形术的神经并发症发生率在回顾性研究中相对较低:Wang 等^[3]对 202 例脊柱畸形矫形患者的研究发现,8 例(4.0%)出现新的神经功能障碍,末次随访时,4 例患者神经功能有一定程度好转,4 例患者完全康复。Sugawara 等^[4]对日本 2129 例患者资料的研究显示,脊柱畸形矫形术后神经功能障碍发生率为 5.4%。Yagi 等^[5]对矫形术后随访 2 年的 285 例成人脊柱畸形患者的研究发现,神经并发症发生率为 10.0%(29 例),其中 11 例为永久性并发症。Kim 等^[12]对 233 例脊柱畸形矫形患者的研究显示,14.2%的患者术后出现神经功能障碍。

而在前瞻性研究中脊柱畸形矫形术中神经并发症发

生率则较回顾性研究更高: Cerpa 等^[2]、Fehlings 等^[7]、Kato 等^[8]和 Lenke 等^[9]对一项前瞻性多中心国际 Scolio-RISK-1 研究数据的分析显示,23.0%(61/265)的患者出院时下肢肌力较术前下降,表明回顾性研究可能低估了脊柱畸形矫形术后的神经系统并发症发生率。Kelly 等^[10]的研究佐证了这一可能性,该研究发现前瞻性研究中新的神经功能损伤发生率为 17.3%(95%CI=12.6%~22.2%),而在回顾性分析中则为 9.0%(95%CI=5.0%~13.0%),可见在前瞻性研究中,新的神经功能损伤率几乎是采用相同纳入标准的回顾性研究的 2 倍。

2 危险因素

2.1 影像学参数

2.1.1 主弯位置 中上胸段脊髓本身的血液循环较差,对压迫及纵向牵张的耐受性差,所以中上胸椎局灶性后凸畸形的矫正手术与神经损伤的高风险相关^[11]。Yang 等^[12]发现,主弯在上胸段、中胸段、胸腰段、腰段的患者术后神经系统并发症发生率分别为 40%、26.9%、7.3%和 0,术中诱发电位阳性的发生率分别为 40%、34.6%、12.2%和 11.8%。Zeng 等^[13]对 57 例中重度胸腰椎后凸患者的研究发现,因脊髓损伤而导致术后暂时性双下肢完全瘫痪的 4 例患者术前后凸顶点均位于中上胸椎,同时研究人员发现,与后凸顶点在中上胸椎的患者相比,后凸顶点位于下胸椎或胸腰段的患者,术前后凸角度更大,但术后 Oswestry 功能障碍指数(Oswestry disability index, ODI)改善率更好。

2.1.2 Cobb 角 Xia 等^[14]对 147 例脊柱畸形患者的研究发现,7 例术后出现神经功能障碍,其中 5 例术前 Cobb 角>100°,提示术前 Cobb 角较大的患者可能有较高的神经功能损伤风险。Xie 等^[15]在单因素分析中发现冠状面主弯 Cobb 角>100°和胸椎过度后凸(Cobb 角>40°)是全椎体切除术(vertebral column resection, VCR)术后神经功能障碍的危险因素,多因素非条件 Logistic 回归分析显示胸椎过度后凸是引起术后神经功能障碍的独立危险因素(OR=

基金项目:2020 年北京市自然科学基金资助项目:退变性腰椎侧凸患者椎旁肌退变的影像学和健康相关生活质量研究(编号:7202230)

第一作者简介:男(1995-),硕士研究生,研究方向:脊柱外科

电话:(010)82267372 E-mail:jiajunni2019@163.com

通讯作者:曾岩 E-mail:zeng-yan@med mail.com.cn

11.883)。部分学者主张使用畸形角比值(deformity angular ratio,DAR),即 Cobb 角除以弯曲中涉及的椎体数目来评价畸形程度。DAR 又包括冠状面畸形角比值(coronal DAR,C-DAR)、矢状面畸形角比值(sagittal DAR,S-DAR)及总畸形角比值(total DAR,T-DAR),其中 $T-DAR=C-DAR+S-DAR$ 。Wang 等^[3]的研究发现, $T-DAR \geq 25$ 的患者术中神经监测异常发生率及神经功能障碍发生率均明显高于 $T-DAR < 25$ 的患者, $S-DAR \geq 15$ 的患者最终神经功能障碍率明显高于 $S-DAR < 15$ 的患者。Fehlings 等^[7]对 265 例患者的多因素分析显示,C-DAR 增加是术后神经功能下降的主要预测因素之一。

2.1.3 畸形类型及合并脊髓畸形 Kim 等^[9]的研究发现,术前脊柱后凸畸形尤其是结核性后凸畸形是术后神经功能障碍的危险因素,术前后凸畸形患者发生术后神经功能障碍的风险比无后凸患者高 22 倍。Xie 等^[15]发现脊柱侧凸伴胸椎后凸($OR=11.883$)及合并脊髓畸形($OR=18.423$)与术后神经功能障碍呈正相关。Godzik 等^[16]的研究发现,在合并 Chiari 畸形和/或脊髓空洞的青少年特发性脊柱侧凸患者中,有 28% 的患者存在术中神经监测异常,术后有 11% 出现神经系统并发症,而对不合并 Chiari 畸形和脊髓空洞的患者来说,相应比例分别为 3% 和 0。Chen 等^[17]的研究显示,合并骨性脊髓纵裂的先天性脊柱侧凸患者术后一过性神经功能障碍发生率明显高于合并膜性脊髓纵裂者(27.3% vs 0)。对于脊柱畸形合并 Chiari 畸形、脊髓栓系或骨性脊髓纵裂的患者,目前多数学者认为应由神经外科医生一期行脊髓畸形手术,3~6 个月后由脊柱外科医生二期行脊柱畸形矫形术,但 Wang 等^[18]的研究认为,一期手术破坏了局部解剖结构并使局部粘连,增加了二期手术的难度及医源性神经损伤的几率,该作者为 12 例合并脊髓畸形的脊柱畸形患者施行了同期手术,患者术后均未出现新发神经功能障碍。

2.1.4 脊髓形态程度 Sielatycki 等^[19]设计了一个简单的三层分类系统来描述轴向 T2WI 上胸椎畸形顶点的脊髓形态:1 型,脊髓形态正常,脊髓和顶端椎弓根和/或椎体之间有脑脊液信号;2 型,脊髓形态正常,脊髓和顶端椎弓根和/或椎体之间没有脑脊液信号;3 型,脊髓变形,脊髓和椎弓根和/或椎体之间没有脑脊液信号。其对 128 例患者的研究显示,1 型和 2 型脊髓患者术中神经监测异常的发生率分别为 7.4% 和 12.5%,而 3 型脊髓患者为 80%,说明 3 型脊髓患者术中神经监测异常的几率显著增加($OR=28.3$)。

2.2 个体年龄和临床表现因素

2.2.1 年龄 与年轻患者相比,老年患者神经组织对损伤的耐受性及恢复能力降低。Fehlings 等^[7]的研究显示,年龄增加是术后神经功能下降的主要预测因素之一。Qiao 等^[20]对 5377 例脊柱畸形患者的回顾性分析发现,高龄是术后迟发性神经功能障碍的危险因素。Yamato 等^[21]对 1192 例患者的研究显示,年龄 ≥ 65 岁的患者术后神经功能下降

的发生率明显高于年龄 < 65 岁的患者。

2.2.2 术前神经功能状态 Xie 等^[15]对 76 例严重僵硬脊柱畸形患者的研究发现,术前已有神经功能障碍是术后新发神经功能障碍的独立危险因素($OR=49.322$)。Yagi 等^[19]对 285 例患者的研究发现,术前日常生活活动能力下降是术后发生运动功能障碍的独立危险因素($OR=4.0$)。Yang 等^[22]的研究将患者分为 3 组:A 组,术前 MRI 显示脊髓正常,神经诱发电位正常,无神经症状;B 组,术前 MRI 显示脊髓异常和/或神经诱发电位异常,但无神经症状;C 组,术前 MRI 显示有或无脊髓异常/神经诱发电位异常,但有神经症状;该研究分析发现,C 组患者术后神经功能损伤的发生率为 26.9%,明显高于既往无神经功能障碍的 2 组患者(A 组和 B 组分别为 4.3% 和 18.7%)。

2.3 手术因素

2.3.1 手术节段及椎体切除数量 Fehlings 等^[7]的研究对 265 例患者的多因素分析显示,腰椎截骨术是术后神经功能下降的主要预测因素之一($OR=3.3$),这一结论出乎了作者的预料,作者认为:腰椎术后神经功能的下降主要为神经根性症状,这与 SPO 截骨导致的椎间孔狭窄相关;且本组人群中评估术后神经功能损伤使用的是下肢运动评分(lower extremity motor scores,LEMS),L2 水平神经根受损所致的屈腿障碍占比最高,而腰椎截骨术也最常在 L2 水平进行,所以腰椎截骨术与神经功能下降之间的联系很可能被高估了。Xie 等^[15]的研究发现,椎体切除数 ≥ 2 个与术后神经功能障碍呈正相关($OR=8.769$),椎体切除数量是神经功能障碍的独立危险因素;同时发现术后神经功能障碍与节段血管结扎的数量相关,强调保护节段血管、维持血压和红细胞压积非常重要,并且应尽量减少椎体切除数量。Kim 等^[9]对 233 例患者的研究亦得出了类似的结论:椎体切除 ≥ 2 个对术后神经功能障碍的发生有显著影响。

2.3.2 截骨方式 在脊柱矫形术中,三柱截骨与后柱截骨或不截骨相比,创伤更大、手术难度及技术要求更高,神经损伤风险亦更高。Qiao 等^[20]对 5377 例脊柱畸形患者的研究发现,截骨术是术后迟发性神经功能障碍的危险因素。Lui 等^[22]对 68 例手术患者的研究显示,接受多节段后外侧椎体间融合术的 34 例患者出院时神经损伤发生率为 2.94%(1/34),6 周后均恢复;接受经椎弓根楔形闭合截骨(pedicle subtraction osteotomy,PSO)的 34 例患者出院时神经损伤发生率为 14.7%(5/34),术后 2 年内均未恢复。Sze 等^[23]对 142 例接受后柱截骨(posterior column osteotomy,PCO)的儿童脊柱畸形患者的研究显示,术后神经损伤发生率为 0。Kim 等^[24]对 564 例成人脊柱畸形患者的研究显示,进行椎体间融合与神经系统并发症的风险增加相关($OR=2.1$)。

2.3.3 手术入路及翻修手术 Qiu 等^[25]对 1373 例脊柱侧凸患者的研究显示,前路、后路和联合入路手术的神经并发症发生率分别为 0.95%(2/211)、1.24%(9/725)和 3.43%(15/437),联合入路手术和后路手术的神经并发症发生率

差异有统计学意义,但前路手术和联合入路手术之间无统计学差异($P=0.07$),对其中 756 例青少年特发性脊柱侧凸患者的研究得出了相同结论。翻修手术可能是神经系统并发症的一个危险因素,因为翻修面临着解剖结构改变、经融合块截骨、瘢痕组织形成、多合并术前神经功能障碍等问题,这些均增加了手术过程的复杂性。Kim 等^[24]对 564 例成人脊柱畸形患者的研究显示,翻修手术与神经系统并发症的风险增加相关。Qiu 等^[25]对 1373 例脊柱侧凸患者的研究显示,翻修手术与初次手术相比,神经并发症明显升高(5.97% vs 1.68%),对其中 756 例青少年特发性脊柱侧凸患者的研究显示,翻修手术和初次手术的神经并发症发生率分别为 8.33% 和 0.82%,二者有显著性差异。

3 风险监测

术中神经监测(intraoperative neuromonitoring, IONM)用于监测和预防脊髓损伤,已成为有效地保证临床疗效的重要手段^[26]。IONM 包括 Stagnara 唤醒试验、体感诱发电位(somatosensory evoked potentials, SSEPs)、运动诱发电位(motor evoked potentials, MEPs)、经颅运动诱发电位(transcranial motor evoked potentials, TcMEPs)、下行神经源性诱发电位(descending neurogenic-evoked potentials, DNEPs)、自发肌电图(spontaneous electromyography, sEMG)、触发式肌电图(triggered electromyography, tEMG)等。

在常规监测 TcMEP 之前,Stagnara 唤醒试验曾被用作 SSEPs 变化时的辅助手段,即如果术中有 SSEPs 变化,通常会进行 Stagnara 唤醒试验以帮助决定是否更换或移除内固定。但由于唤醒试验时效性差,不适用于低龄、智力障碍等无法配合的患者,且易出现气管导管脱出、大出血、患者躁动等风险,随着多模式神经监测的常规应用,只有在出现警报但又无法可靠地实现多模式神经监测时,才会使用 Stagnara 唤醒试验^[41]。

SSEPs 主要通过电流刺激周围神经并记录皮层和皮层下的电位来监测脊髓后索的功能,用于评价脊髓感觉传导通路的功能状态。SSEPs 无法识别脊髓前索的损伤,由于神经存在交叉支配,SSEPs 在识别单一神经根损伤方面效果有限,且易受低血压、低温、麻醉剂的影响,故现在 SSEPs 较少单独使用,常作为多模式神经监测的一部分,与 TcMEPs 和 EMG 一起使用^[28]。

在 TcMEPs 出现之前,人们试图通过刺激脊髓来记录周围神经或肌肉的运动诱发电位,即 DNEPs,但 Minahan 等^[29]的研究发现,DNEPs 信号的变化更多地与感觉通路的逆行传导有关,而与运动通路关系不大。但 DNEPs 可以通过在脊柱沿线的多个点进行系统性刺激,帮助定位脊髓缺损区域。Chen 等^[30]对 74 例术中 MEP 阳性的严重脊柱畸形患者的研究发现,DNEPs 阴性组患者的 MEPs 改善率、唤醒试验中及术后神经功能正常的比例均明显高于 DNEPs 阳性组患者,并认为术中 DNEPs 可作为辅助 MEPs 监测神

经损伤的重要定量工具,可作为 MEPs 丢失后的临时替代监测技术。TcMEPs 用于直接监测脊髓的运动通路,监测脊髓前索的功能状态,弥补了 SSEPs 的不足。Ushirozako 等^[29]对 295 例术中接受多通道 TcMEPs 监测的脊柱畸形患者的研究显示,TcMEPs 在检测神经根损伤方面敏感性为 94%,特异性为 94%。Magampa 等^[31]对 299 例脊柱畸形患者的研究显示,TcMEP 监测具有 100% 的阴性预测值。

sEMG 可以记录术中患者肌肉的自发电位,提供实时信息。大多数情况下,手术操作中的短暂性神经刺激即可导致 sEMG 出现明显变化,故该监测方法假阳性率过高。但 sEMG 是脊柱手术过程中神经监测的有效辅助手段,弥补了 SSEPs 和 MEPs 的非实时性。tEMG 则通过刺激椎弓根螺钉并记录椎旁肌肌电图,来评估椎弓根骨皮质是否被穿破,进而评估螺钉置入位置是否合适。

现在越来越多的研究发现多模式监测可以早期发现即将出现的神经功能障碍,优于单一监测模式。Huang 等^[32]对 82 例严重胸椎畸形患者的研究显示,多模式神经监测(SSEPs+MEPs+DNEPs)发现了 39 例患者存在潜在的神经功能障碍,经过预警及处理,只有 9 例患者术后出现神经功能障碍,表明多模式神经监测是一种有效的监测策略。Thuet 等^[33]对 3436 例儿童脊柱畸形患者的研究中,神经监测发现 74 例(2.2%)存在潜在的神经功能障碍,7 例患者的神经功能障碍未被发现,联合应用 SSEP、TcMEPs、DNEPs 和 EMG,可准确检测 99.6% 的患者的永久性神经功能状态。Bhagat 等^[34]对 354 例脊柱畸形患者的回顾性研究显示,多模式神经监测(SSEPs+MEPs)的总体敏感性为 100%,特异性为 99.3%。

4 预防措施

神经损伤作为脊柱矫形术中最严重的并发症之一,一旦发生,对患者的预后将造成严重的影响,尤其是永久性神经损伤,将很大程度上降低患者的术后生活质量。脊柱矫形术的神经功能损伤重在预防,除了进行充分的术前评估、尽量保持术中平均动脉压 $\geq 10.7\text{kPa}$ (80mmHg)及提升手术技术外,严密的术中神经监测和使用高新的计算机辅助技术在神经损伤的预防中均能发挥一定作用。

4.1 术中神经监测

多模式神经监测被认为是一种既敏感又特异的脊柱手术中神经损伤的检测方法,目前最常用于术中神经功能监测的是 SSEPs+TcMEPs。若术中神经监测出现警报,监测者应立即检查可能导致信号监测器变化的任何技术或麻醉因素,排除假阳性结果。技术检查包括导线移位、患者体位、刺激和接收设备测试;同时,麻醉医师需检查患者血压、体温、麻醉深度、血红蛋白浓度和给药情况,应考虑停止吸入药物、减少静脉麻醉剂、确认没有神经肌肉阻滞、将血红蛋白维持在 $>90\sim 100\text{g/L}$,并将平均动脉压至少增加到 12kPa (90mmHg)^[35]。如果上述因素均已排除,则应立即告知手术医生,决定是否停止手术操作、检查脊髓神经状态、

更换或移除内固定以及是否进行 Stagnara 唤醒试验^[27]。

4.2 数字技术辅助置钉、引导截骨矫形

重度脊柱畸形患者的自身解剖结构往往存在明显异常,这些解剖异常使置钉时螺钉易进入椎管造成脊髓或神经机械性损伤,还易造成截骨时方向偏离、位置误差甚至神经损伤。近年来随着数字化骨科辅助技术的快速发展,为避免脊柱矫形术中神经损伤提供了有力的保障。其中,计算机辅助设计——快速成型 (computer aided design-rapid prototype,CAD-RP) 技术及导板导航技术(template navigation technology)、计算机三维导航系统(computer assisted 3D navigation system) 以及虚拟现实/增强现实(virtual reality/augmented reality,VR/AR)技术等,在脊柱畸形矫形术中辅助完成置钉及引导截骨矫形有着独到的作用。CAD-RP 技术是将脊柱的 CT 断层数据整合后重建成三维立体图像,再利用快速成型技术将三维图像制作成等比例实物模型,利于术者对复杂畸形获得全方位认识。导板导航技术则是在 CAD-RP 技术的基础上,将数据导入三维重建软件,设计最佳钉道,并将最佳钉道与模板整合,利用 3D 打印机,打印出导航置钉模板辅助术中置钉,目前研究显示,运用该技术进行椎弓根螺钉置入,置钉的准确性较高^[36,37]。计算机三维导航系统则包括 C 型臂导航系统和 O 型臂导航系统,C 型臂导航系统可通过三维 C 型臂机自动旋转采集并合成三维图像,O 型臂导航系统可在短时间内完成 360°收集图像并合成三维图像,让术者在接近“直视下”完成置钉和截骨^[38]。VR 技术是使用计算机绘制虚拟模型,而 AR 技术则是将此模型融合到使用者所看到的真实景象中,二者均有助于全方位了解复杂畸形结构。此外,还有新兴的手术机器人系统辅助置钉技术,其有效性和实用性有待更多的证据证明。

5 总结与展望

脊髓或神经根损伤是重度脊柱畸形矫形术中多发且严重影响患者预后的并发症之一,目前的研究显示脊柱矫形术后神经功能障碍的发生率为 4.0%~23.0%。矫形术后神经系统并发症的危险因素多种多样,不同研究得出的结论不尽相同。虽然术中神经监测及数字化辅助技术的发展与普及有望降低手术风险,但目前预防手段仍不尽完善。当前还需要更多的临床观察和长期随访的多中心临床研究来对危险因素及预防手段进行系统地评估与分析,以期对重度脊柱畸形患者提供个性化诊疗方案,为脊髓神经并发症的防治提供更多的证据和方法。

6 参考文献

- Zou L, Liu J, Lu H. Characteristics and risk factors for proximal junctional kyphosis in adult spinal deformity after correction surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. Neurosurgical Review, 2019, 42(3): 671-682.
- Cerpa M, Lenke LG, Fehlings MG, et al. Evolution and ad-

vancement of adult spinal deformity research and clinical care: an overview of the Scolio-RISK-1 study[J]. Global Spine J, 2019, 9(1 Suppl): 8S-14S.

- Wang X, Lenke LG, Thuet E, et al. Deformity angular ratio describes the severity of spinal deformity and predicts the risk of neurologic deficit in posterior vertebral column resection surgery[J]. Spine, 2016, 41(18): 1447-1455.
- Sugawara R, Takeshita K, Inomata Y, et al. The Japanese Scoliosis Society Morbidity and Mortality Survey in 2014: The complication trends of spinal deformity surgery from 2012 to 2014[J]. Spine Surg Relat Res, 2019, 3(3): 214-221.
- Yagi M, Michikawa T, Hosogane N, et al. Risk, recovery, and clinical impact of neurological complications in adult spinal deformity surgery [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2019, 44(19): 1364-1370.
- Kim S, Cho B, Kim J, et al. Complications of posterior vertebral resection for spinal deformity[J]. Asian Spine J, 2012, 6(4): 257-265.
- Fehlings MG, Kato S, Lenke LG, et al. Incidence and risk factors of postoperative neurologic decline after complex adult spinal deformity surgery: results of the Scolio-RISK-1 study[J]. Spine J, 2018, 18(10): 1733-1740.
- Kato S, Fehlings MG, Lewis SJ, et al. An analysis of the incidence and outcomes of major versus minor neurological decline after complex adult spinal deformity surgery [J]. Spine, 2018, 43(13): 905-912.
- Lenke LG, Shaffrey CI, Carreon LY, et al. Lower extremity motor function following complex adult spinal deformity surgery[J]. J Bone Joint Surg Am, 2018, 100(8): 656-665.
- Kelly MP, Lenke LG, Godzik J, et al. Retrospective analysis underestimates neurological deficits in complex spinal deformity surgery: a Scolio-RISK-1 Study[J]. J Neurosurg Spine, 2017, 27(1): 68-73.
- Zeng Y, Chen Z, Guo Z, et al. The posterior surgical treatment for focal kyphosis in upper-middle thoracic spine [J]. Eur Spine J, 2014, 23(11): 2291-2298.
- Yang J, Huang Z, Yin J, et al. A proposed classification system for guiding surgical strategy in cases of severe spinal deformity based on spinal cord function [J]. Eur Spine J, 2016, 25(6): 1821-1829.
- Zeng Y, Qu X, Chen Z, et al. Posterior corrective surgery for moderate to severe focal kyphosis in the thoracolumbar spine: 57 cases with minimum 3 years follow-up [J]. Eur Spine J, 2017, 26(7): 1833-1841.
- Xia L, Li N, Wang D, et al. One-stage posterior spinal osteotomy in severe spinal deformities: a total of 147 cases[J]. Clin Spine Surg, 2017, 30(4): E448-E453.
- Xie J, Zhang Y, Wang Y, 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. Godzik J, Holekamp TF, Limbrick DD, et al. Risks and outcomes of spinal deformity surgery in Chiari malformation, Type 1, with syringomyelia versus adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine J*, 2015, 15(9): 2002–2008.
17. Chen B, Yuan Z, Chang MS, et al. Safety and efficacy of one-stage spinal osteotomy for severe and rigid congenital scoliosis associated with split spinal cord malformation [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2015, 40(18): E1005–E1013.
18. Wang K, Shang F, Jian F, et al. Effect of simultaneous surgical treatment in scoliosis associated with intraspinal abnormalities: a retrospective study[J]. *Exp Ther Med*, 2020, 20(5): 108.
19. Sietatycki JA, Cerpa M, Baum G, et al. A novel MRI-based classification of spinal cord shape and CSF presence at the curve apex to assess risk of intraoperative neuromonitoring data loss with thoracic spinal deformity correction [J]. *Spine Deformity*, 2020, 8(4): 655–661.
20. Qiao J, Xiao L, Zhu Z, et al. Delayed postoperative neurologic deficit after spine deformity surgery: analysis of 5377 cases at 1 institution[J]. *World Neurosurg*, 2018, 111: e160–e164.
21. Yamato Y, Matsuyama Y, Hasegawa K, et al. A Japanese nationwide multicenter survey on perioperative complications of corrective fusion for elderly patients with adult spinal deformity[J]. *J Orthop Sci*, 2017, 22(2): 237–242.
22. Lui D F, Butler JS, Yu H M, et al. Neurologic injury in complex adult spinal deformity surgery: staged multilevel oblique lumbar interbody fusion(MOLIF) using hyperlordotic tantalum cages and posterior fusion versus pedicle subtraction osteotomy(PSO)[J]. *Spine*, 2019, 44(16): E939–E949.
23. Sze C, Smith JC, Luhmann SJ. Complications of posterior column osteotomies in the pediatric spinal deformity patient [J]. *Spine Deformity*, 2018, 6(6): 656–661.
24. Kim HJ, Iyer S, Zebala LP, et al. Perioperative neurologic complications in adult spinal deformity surgery [J]. *Spine*, 2017, 42(6): 420–427.
25. Qiu Y, Wang S, Yu Y, 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.
26. Ushirozako H, Yoshida G, Kobayashi S, et al. Transcranial motor evoked potential monitoring for the detection of nerve root injury during adult spinal deformity surgery [J]. *Asian Spine J*, 2018, 12(4): 639–647.
27. Leong JJH, Curtis M, Carter E, et al. Risk of neurological injuries in spinal deformity surgery[J]. *Spine*, 2016, 41(12): 1022–1027.
28. Laratta JL, Ha A, Shillingford JN, et al. Neuromonitoring in spinal deformity surgery: a multimodality approach[J]. *Global Spine J*, 2018, 8(1): 68–77.
29. Minahan RE, Sepkuty JP, Lesser RP, et al. Anterior spinal cord injury with preserved neurogenic "motor" evoked potentials[J]. *Clin Neurophysiol*, 2001, 112(8): 1442–1450.
30. Chen J, Deng Y L, Sui W Y, et al. Intraoperative neuromonitoring auxiliary significance of DNEP for MEP-positive event during severe spinal deformity surgery[J]. *Clin Spine Surg*, 2022, 35(1): E167–E174.
31. Magampa RS, Dunn R. Surgeon-directed transcranial motor evoked potential spinal cord monitoring in spinal deformity surgery[J]. *Bone Joint J*, 2021, 103–B(3): 547–552.
32. Huang ZF, Chen L, Yang JF, et al. Multimodality intraoperative neuromonitoring in severe thoracic deformity posterior vertebral column resection correction [J]. *World Neurosurg*, 2019, 127: e416–e426.
33. Thuet ED, Winscher JC, Padberg A M, et al. Validity and reliability of intraoperative monitoring in pediatric spinal deformity surgery: a 23-year experience of 3436 surgical cases[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2010, 35(20): 1880–1886.
34. 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.
35. Iorio JA, Reid P, Kim HJ. Neurological complications in adult spinal deformity surgery [J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2016, 9(3): 290–298.
36. Alpizar-Aguirre A, Cabrera-Aldana EE, Rosales-Olivares LM, et al. A new technique of pedicle screw placement with the use of sequential multilevel navigation templates based on patient-specific 3D CT reconstruction model: applicability in spine deformity[J]. *Acta Ortop Mex*, 2017, 31(6): 312–318.
37. Guo F, Dai J, Zhang J, et al. Individualized 3D printing navigation template for pedicle screw fixation in upper cervical spine[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171509.
38. Liu Z, Jin M, 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.

(收稿日期:2021-10-13 修回日期:2021-12-18)

(本文编辑 彭向峰)