

专家共识

脊柱外科手术中神经电生理监测临床实践指南

Clinical practical guideline of intraoperative neuroelectrophysiological monitoring for spinal surgery

中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会脊柱外科神经电生理学组, 中国研究型医院学会临床神经电生理专业委员会

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2024.09.14

中图分类号: R741.044 文献标识码: C 文章编号: 1004-406X(2024)-09-0998-11

脊柱外科手术伴随着神经损伤的风险^[1-5]。术中神经电生理监测(intraoperative neuroelectrophysiological monitoring, IONM)是指在手术过程中应用神经诱发电位、肌电等神经电生理技术实时检测神经功能,以便及时发现可能出现的神经损伤,提示术者采取必要的干预措施,防止不可逆神经损害,最大限度减少神经损伤^[1,6]。

自 1977 年开始使用体感诱发电位监测(somatosensory evoked potential, SEP)(如 D 波)等技术,随后又发展了经颅电刺激运动诱发电位(transcranial electrical motor-evoked potentials, TceMEP)、肌电图(electromyography, EMG)以及脊髓诱发电位形成多模态神经电生理技术。所有涉及神经损伤风险的脊柱外科手术都是 IONM 的适用范围,SEP 与 EMG 监测没有明确禁忌证,但应用 MEP 需要注意脑出血、癫痫病史和带有颅脑金属内置物的患者需经过评估后慎用。国际上已将 IONM 作为脊柱外科手术的重要组成部分,我国 20 世纪 90 年代后期开始将 IONM 应用于脊柱外科,近年来脊柱外科手术中 IONM 技术水平得到很大提高和广泛普及。

为帮助脊柱外科医生和专业监测人员在脊柱外科手术中实施规范化的 IONM,2019 年中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会脊柱外科神经电生理学组组织发表了《规范化脊柱外科手术中神经电生理监测技术的专家共识》,受到业界的广泛关注和认可。然而已发表的共识在一些细节中不够完善,在 IONM 基本概念、设备与人员实施管理、麻醉管理规范、不同 IONM 技术适用范围和临床成本效益等方面缺少规范。为推动脊柱外科 IONM 的临床应用,中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会脊柱外科神经电生理学组和中国研究型医院学会临床神经电生理专业委员会,决定总结与更新循证医学证据和临床实践经验,针对脊柱外科医生、IONM 从业者和医院管理者,制定一套综合完整的系统性脊柱外科 IONM 临床实践指南。

1 指南制订方法

本指南设计与制订方法依据《中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022 版)》^[7,8]。2023 年 6 月和 9 月,由中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会脊柱外科神经电生理学组和中国研究型医院学会临床神经电生理专业委员会组织起草本标准的专家分两次向全国广泛征集 2019 年脊柱外科 IONM 专家共识应用经验和临床实践中所面临问题,在此基础上,由组织起草本标准的两个专业委员会专家组成指南指导委员会、指南制定专家组、指南审定专家和指南制订工作组。其中,指南制订工作组负责检索和分析国内外文献资料,进行证据等级判别,通过荟萃分析获取循证医学证据。指南指导委员会对指南的制订提出指导、监督和审核。指南制定专家组接受指南制订工作组的问卷调查,以德尔菲法函询方式回复本指南中的关键临床问题。指南审定专家由资深脊柱外科专家和神经电生理专家组成,负责本指南的审稿。所有指南制订工作组、专家组成员均签署利益冲突声明,不存在任何与本指南主题相关的利益冲突。

指南起草过程,通过 PUBMED、中国知网和万方数据库,对脊柱外科、术中神经电生理监护、术中电生理监测和肌电诱发电位以及对应的英文进行检索。本指南用 GRADE 系统,对所收集循证医学证据分为三级:A 级,高质量,荟萃分析、系统综述、多中心临床研究、国际临床指南/标准、大样本队列研究(大于 100 例);B 级,一般,病例对照研究、小样本临床研究(少于 100 例)、专著;C 级,低质量,病例报道、临床经验、观察性论点、专家评论。指南的推荐等级由指南制定专家组通过德尔菲法函询方法,确定为高、中、低三种推荐强度。推荐强度的确定除了循证医学证据外,还要考虑医疗效率、患者偏好、医院分级与地区差异、医疗经济效益和可行性。

本指南已经在国际实践指南注册与透明化平台(Practice Guideline Registration for Trans PAREncy, PREPARE)网站登记注册(PREPARE-2023CN794)。

基金项目:深圳市引进高层次医学团队项目(编号:SZSM202211004)

通讯作者:胡勇 E-mail:huyong@hku-szh.org

2 设备与安全管理规范

根据《医疗器械监督管理条例》规定,IONM 使用专用的神经电生理监测仪器属于三类医疗器械,术中监测设备在使用、保管、维护中应符合医用设备安全标准的相关要求,配件选择遵守中国医疗器械管理法规。(证据级别 A,推荐级别 A)。

术中神经电生理监测设备应具备神经电生理信号处理与分析功能,包括以下性能:存储和显示多个波形、平均叠加(应具备奇偶叠加功能)、平滑、数字滤波、自动伪迹去除等功能。设备配置主要技术指标(基本配置及选配)见表 1^[9-11]。

3 监测人员培训与管理规范

脊柱外科 IONM 涉及神经生理学、临床医学和生物医学电子工程学等多学科交叉的特殊性专业技术领域,需要具备多学科综合素质的术中监测技术人员^[9,12-14]。

国际上对脊柱外科 IONM 从业人员的管理,美国推行得最早,经过多年的临床实践,美国临床神经电生理学会(American Clinical Neurophysiology Society,ACNS)和神经电生理监测学会(American Society of Neurophysiological Monitoring,ASNM)等多个行业学会组织,形成“宽进严出”的培训与考核机制^[12],值得借鉴。

目前,我国脊柱外科 IONM 从业人员来自临床医学专业和医学相关学科的不同专业,无论接受何种基础教育,脊柱外科 IONM 从业人员必须经过专业培训,培训内容应包括临床神经电生理、脊柱外科医学基础知识、神经解剖、神经生理病理学、脊柱生物力学和神经电信号检测与处理^[15]。鉴于我国尚未建立国家统一的术中神经电生理专业考核体系,参照国际行业组织管理的基本理念^[9,12-17],脊柱外科 IONM 技术人员经过专业培训后,由其所在的脊柱外科主管团队考核通过,可以在规定范围内开展脊柱外科 IONM 工作。(证据级别 A,推荐级别 B)。

脊柱外科 IONM 从业人员每年必须接受相关的医学继续教育培训^[12,15],内容包括脊柱外科手术进展、临床神经电生理、脊柱脊髓损伤机理与预防机制。

4 IONM 操作规范

4.1 体感诱发电位(SEP)

SEP 属非侵入性的检测方法,简便易行,是使用最早和最广泛的一种脊柱外科术中监测技术^[18]。SEP 通过直接刺激外周混合神经而获得的,刺激位置取决于不同手术的要求及手术风险涉及的神经^[18,19]。参考国际脑电标准(2017)中制定的改良 10-20 系统^[17]和规范化 SEP 刺激记录设置(表 2)^[18-24],获得不同记录通道 SEP 典型波形(图 1)。

术中 SEP 监测以潜伏期和波幅为测量指标,将术中测量的 SEP 潜伏期和波幅与基线数值进行比较。建议基线选择脊柱术区暴露后的信号记录,使监测更为稳定和可靠。推荐使用的 SEP 报警标准:与基线相比,波幅降低 50%,或潜伏期延长 10%^[18,19,24]。(证据等级 A,推荐等级:A)。

异常判定标准不能绝对化,建议各监测团队与其手术团队针对不同手术,建立适宜的监测判据,例如对特发性脊柱侧凸矫形手术监测中,有团队判断标准为:潜伏期延长 10%或波幅缓慢降低 60%,在手术关键步骤时,波幅下降 30%也提出报警^[19]。

4.2 运动诱发电位(motor-evoked potentials,MEP)

MEP 用于监测运动神经通路功能,IONM 广泛采用的是 TceMEP 技术。参考规范化 TceMEP 刺激记录设置(表 3)^[23,25-32],可获得不同记录通道 TceMEP 典型波形(图 2)。

TceMEP 监测的影响因素分为技术性和非技术性。技术性因素主要是电极放置位置以及各种联接的准确、稳定,还有术中监测设备的接地和抗干扰措施。非技术性因素包括:体温、血压、麻醉。有关麻醉影响的讨论见本指南“5.1 IONM 过

表 1 IONM 设备的技术指标

设备配置项目	技术指标
通道数	基本配置:8 通道;选配:16 通道或 32 通道
放大器特性	输入阻抗 $\geq 100\Omega$;噪声水平 $\leq 5\text{mV p-p}$ 。(10~3000Hz);共模抑制比:基本配置 90db;选配:110db;采样率: $>5000\text{Hz}$ 每通道
平均叠加	1~10,000 次;叠加方式提供相干、加减、奇偶等选择
经皮电刺激器参数	最大刺激强度:基本配置 50mA/200V;选配 100mA/400V;脉宽:50~1000 μs
经颅电刺激器	最大刺激强度:基本配置 100mA/400V,选配:高于 200mA/800V;脉宽:50~1000 μs ;串刺激:3~10 串刺激,串刺激频率:200~500Hz
显示灵敏度	基本配置:纵向显示灵敏度每格 0.5~20mV,横向显示灵敏度每格 1~200ms;选配:纵向显示灵敏度每格 0.01~20mV,横向显示灵敏度每格 0.5~1000ms

程中的麻醉管理”。患者体温特别是核心温度下降或者血压下降时,会导致 TceMEP 的潜伏期延长、波幅下降和刺激阈值增加^[25]。在长时间手术中,即使麻醉水平和其他生理变量保持不变,TceMEP 波幅也可能会降低。应迅速评估其他监测模式(如 SEP)的信号或有条件可加上参照通道进行监测,将有助于判断 TceMEP 异常变化的原因,避免假阳性结果。

在手术开始时,通过分析 TceMEP 波形的刺激伪迹、信号漂移和波形质量,判断刺激是否有效、刺激部位是否准确,便于及早调整刺激位置及刺激参数,并根据波幅大小设定刺激强度,建立术中 TceMEP 参考基线。TceMEP 监测以连续监测中出现波形异常改变、潜伏期延长或波幅明显降低,预警标准见表 3。本指南推荐以 TceMEP 幅值降低 80%作为异常信号的报警判据。(证据等级:A,推荐等级:B)。异常判定标准不能绝对化,建议各个监测团队与其手术团队根据自己临床研究和分析建立适宜的监测判据。(证据等级:B,推荐等级:B)。

4.3 术中肌电图监测技术

术中 EMG 以定性定量的方式监测术中不同情况下肌肉收缩时发生的电活动。术中 EMG 监测有两种:自发性 EMG 和触发性 EMG。规范化术中肌电图术中监测方案见表 4^[23,33-36],EMG 电极位置详见表 5^[26,33-36]。自发性 EMG,又称自由描记 EMG,具有即时、连续、敏感性强的特点,自发肌电波形示例见图 3。触发性 EMG 为非持续性监测,主要用于监测椎弓根钉

表 2 规范化 SEP 的操作方案

刺激方法	记录方法
<p>上肢 SEP</p> <p>刺激位置^[18-21]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 常规:腕部正中神经或尺神经 <p>刺激电极^[20]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 常规:表面电极 * 备选:针电极(当患者皮下组织太厚或皮肤问题等造成表面电极阻抗过高) <p>刺激参数^[18-21]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 恒流矩形电脉冲刺激 * 刺激强度 15~35mA * 脉宽 0.2~0.3ms * 刺激频率 2~5Hz(避免使用电源工频 50Hz 的倍数频率,防止出现时间锁定性伪影) <p>刺激采用左-右单侧交替刺激,两侧同时刺激所记录的 SEP 可能会掩盖单侧损伤所造成的波形变化^[18,20]</p>	<p>记录位置^[20-22]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 常规:CP3、CP4,参考电极位于 Fpz * 常规导联:CP4-Fpz 对应左侧刺激,CP3-Fpz 对应右侧刺激 * 备选导联:CP4-CP3 对应左侧刺激,CP3-CP4 对应右侧刺激 * 附加:颈 2 或颈 5(C2s 或 C5s),以 Fpz 作为参考电极,记录下皮层体感诱发电位(sub-cortical SEP,SCSEP) * 参考信号通道:ERB's 点 <p>记录电极</p> <ul style="list-style-type: none"> * 针电极 <p>记录参数^[20-22]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 滤波器设置为 20~3000Hz * 关闭 50Hz 陷波滤波器 * 扫描速度 50ms * 叠加次数 100~500 次
<p>下肢 SEP</p> <p>刺激位置^[18-21]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 常规:胫后神经 * 备选:腓骨小头处的腓神经和腓窝处的胫神经 <p>刺激电极^[20]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 常规:表面电极 * 备选:针电极(当患者皮下组织太厚或皮肤问题等造成表面电极阻抗过高) <p>刺激参数^[18-21]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 恒流矩形电脉冲刺激 * 刺激强度 30~60mA * 脉宽 0.2~0.3ms * 刺激频率 2~5Hz (避免使用电源工频 50Hz 的倍数频率,防止出现时间锁定性伪影) <p>刺激方式:左-右单侧交替刺激,(两侧同时刺激记录 SEP 可能掩盖单侧损伤所造成的波形变化^[18,20])</p>	<p>记录位置^[20-22]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 常规:CPz,参考电极位于 Fpz * 常规导联:CPz-Fpz * 备选导联:CP3-CP4 或 CP4-CP3 * 附加:颈 2 或颈 5(C2s 或 C5s),以 Fpz 作为参考电极,记录下皮层体感诱发电位(sub-cortical SEP,SCSEP) * 参考信号通道:腓窝 PF <p>记录电极</p> <ul style="list-style-type: none"> * 针电极 <p>记录参数^[20-22]</p> <ul style="list-style-type: none"> * 滤波器设置为 20~3000Hz * 关闭 50Hz 陷波滤波器 * 扫描速度 100ms * 叠加次数 100 至 500 次

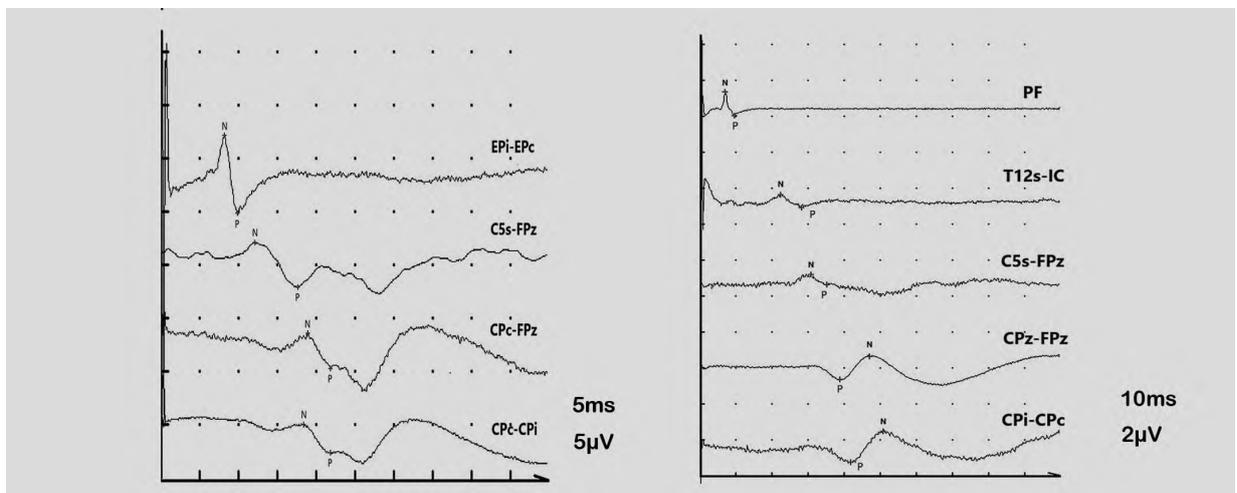


图 1 SEP 记录波形示例

道或螺钉位置的安全性、鉴别脊髓或神经根、识别瘢痕粘连严重的神经组织与非神经组织以及选择性脊神经根切断。

可靠的 EMG 监测首先需要合理选择覆盖手术范围内各节段脊神经支配的靶肌;其次,需要考虑麻醉药物的影响,特别要关注神经肌肉剂的使用剂量,可以用四联刺激实验(train of four test, TOF)进行评估。自发性 EMG 监测过程中常常会出现各种干扰,大多数是各种机器的电干扰、记录线颤动或脱落等原因造成的,应区分与辨别干扰,结合手术进程综合分析,避免假阳报警^[23,33-36]。

自发性 EMG 可持续地监测神经根或神经纤维受到手术操作的激惹、牵拉、压迫;触发性 EMG 主要监测椎弓根钉道或螺钉位置的安全性。(证据等级:B,推荐等级:B)。

4.4 脊髓诱发电位(spinal cord evoked potential, SCEP)与 D 波监测技术

SCEP 是指在脊髓直接记录的诱发电位信号,所记录的诱发电位可以是经颅刺激脊髓记录的 SCEP(D 波)、经脊髓刺激脊髓记录的 SCEP 和经外周神经刺激脊髓体感诱发电位(Spinal SEP)^[18,23,37]。其中 Spinal SEP 的工作原理与 SEP 相似,脊柱外科手术临床中应用比较少。经颅电刺激 SCEP 通常是由两个波形组成,前面一个称为 D 波(direct)。后面跟随一个或一组波称为 I 波(indirect)。脊柱外科手术中记录的 D 波表现稳定,而 I 波受干扰因素较多,在术中监测中主要依据 D 波测量结果进行判断(图 4a)。经高节段脊髓刺激后在低节段脊髓可以检测到 SCEP 是另一种下行性神经传导监测方法(图 4b)。

脊柱手术中脊髓记录电极由外科团队放置。在诱导麻醉后,在透视监视下经皮穿刺放置柔性硬膜外电极,通常将电极置于蛛网膜下腔。也可以在手术显露后,将电极放置于硬膜外作为记录电极。

经颅电刺激采用单脉冲就可以引出 D 波,刺激强度 100~300V,刺激脉宽 200~500 μ s,刺激位置和 TceMEP 相同,由于 D 波潜伏期较短,可以采用较高的刺激频率(11~71Hz),建议采用 11 或 21Hz,单次刺激就可以引出 D 波电位,为去除杂波干扰,建议使用 10~20 次叠加平均的波形进行幅值和潜伏期测量。

经脊髓刺激记录的 SCEP,因为采用硬膜电极刺激,需要对刺激强度加以限制,建议使用 10~30V 恒压电刺激,0.2ms 脉宽的单脉冲方波,刺激频率选用 11~71Hz,可以有效地快速检测到 SCEP。脊髓刺激 SCEP 的信号质量好、幅值高、潜伏期短,信号记录时,应选择 100~3000Hz 的滤波,10~20ms 的扫描时间,单次刺激就可以引出 SCEP 信号,但为保证监测信号的稳

表 3 规范化 TceMEP 的操作方案

刺激记录方法	预警标准 ^[17,29,30,32]
刺激位置 ^[24-26] * 阳极置于 Cz 电位点向前 2cm,阴极分别置于 C3、C4 刺激对侧 TceMEP * 半球间导联(跨 C3~C4 或 C1~C2 经颅电刺激) 刺激电极:针电极 刺激参数 ^[23,27] * 经颅多脉冲方波电刺激,3 到 8 个串刺激,刺激脉冲宽度在 0.1~0.3ms,脉冲间隔 1~6ms(建议使用 2ms),刺激强度 300~1000V。 记录方法 * 皮下针电极或表面电极 * 记录电极放置在运动神经支配肌肉,如上肢的拇短展肌,下肢的趾外展肌或胫前肌。 * 观察窗口 100ms,灵敏度为 50~100 μ V/Div,滤波器设置为 20~3000Hz。	* “有或无”标准,以 TceMEP 波形是否存在作为判断依据 * 以幅值降低超过 50%~80%作为判据 * 与建立基线时的刺激阈值相比,增加刺激强度 > 100V 才能引出 TceMEP 者,可作为预警标准 * 以幅值降低超过 70%且潜伏期延迟 \geq 10%相结合作为判据 * 综合考量幅值、潜伏期、波形形态来判断是否出现异常

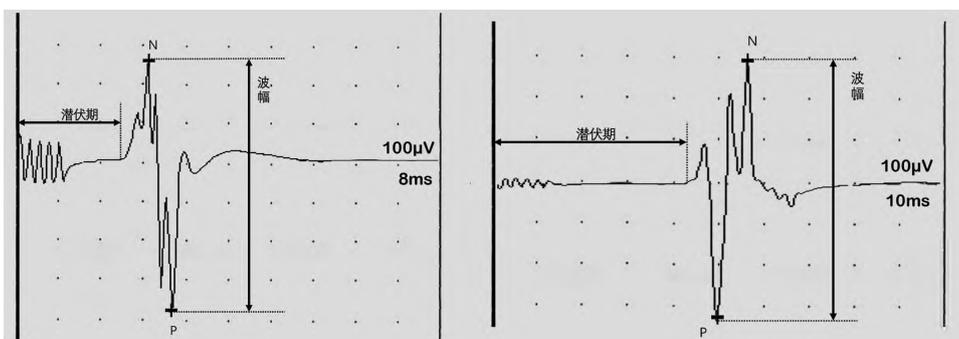


图 2 TceMEP 波形示意图 (1)拇短展肌 (2)趾外展肌

定与可靠,建议使用 10~20 次叠加平均的结果进行幅值和潜伏期测量。

D 波和 SCEP 都是在脊髓上直接记录的神经电生理信号,具有非突触传递性,无论是在吸入麻醉还是神经肌肉阻滞都不会影响信号的记录。信号稳定可靠。临床数据可以证明在阈值控制下脊髓刺激和记录的安全性^[6]。SCEP 因为采用不同部位的刺激记录组合而表现不同波形形态,但在同一手术中固定的刺激-记录组合会呈现稳定的波形。需要注意在术中可能产生电极移位出现诱发电位变化。另外,D 波和 SCEP 在涉及下腰椎和骶椎的神经功能监测中有局限性,需要结合其他神经电生理技术^[38-40]。

D波是由皮层运动神经元细胞直接被刺激引发的兴奋,经皮质脊髓束传导所产生的波形^[37],其后跟随的 I 波是皮层运动神经元受突触前的其他单元所产生兴奋而间接产生的反应。SCEP 是一种综合神经传导信号,所反映的是脊髓侧束以及其他脊髓传导束中的大直径神经纤维信号传递^[37]。术中脊髓监测中的 D 波和 SCEP 都是对潜伏期和幅值进行测量,以幅值降低超过 50%或潜伏期延长超过 10%作为判断依据,预报脊髓神经功能损伤^[18,37]。

在 TceMEP 无法监测的手术中,可以选用 D 波或脊髓刺激 SCEP 进行神经运动功能监测^[18,37]。(证据等级:A,推荐等

表 4 规范化术中肌电图术中监测方案

刺激记录方法		波形解读及异常标准
自发性 EMG	自发性 EMG,无需电刺激触发记录方法 * 皮下针电极或表面电极 * 依据手术计划和神经损伤风险,在相对应脊神经节段的肌肉放置记录电极(表 5) * 带通滤波范围 10~3000Hz,时基 10~500ms/Div,灵敏度 50~500μV/Div	* 静息肌电(resting EMG activity):在正常状态下,术中肌肉处于静息,所记录的波形为直线波形。 * 爆发性肌电活动(burst EMG activity):在短时间内(<1s),肌肉运动单位同步发生放电活动,表现为在平静的基线上突然出现一个或几个突发的高尖双相波或多相波,常见于手术操作中触碰或激惹神经根引起的一过性反应。 * 连续发生的肌电活动(train EMG activity):一组连续发生的肌电活动波形,表现为连续双相波或多相波,提示神经受较严重的或持续的机械性刺激或过度牵拉、压迫。 * 自发性肌电活动(spontaneous activity):没有明显刺激因素而出现的自发产生的肌肉放电活动,表现为肌束持续有规律的收缩,呈现出持续有规则和低波幅的单相波,提示神经受到牵拉、电烧、冷冲洗液冲洗等刺激后
触发性 EMG	刺激位置 * 手术对应神经根 刺激电极: * 直接刺激电极,如单头同心圆双极电极、双头分叉刺激电极等 * 间接刺激电极,如 Prass(单极)电极、鳄鱼夹电极等 刺激参数 ^[23,33-35] * 直接刺激频率 1.1~4.71Hz,刺激间期 0.05~0.3ms,恒定电流刺激强度 0~5mA * 间接刺激频率 1.1~4.71Hz,刺激间期 0.2~0.5ms,恒定电流刺激强度 0~50mA。 记录方法 ^[23,33-36] * 与自发性 EMG 相同	诱发 EMG 刺激强度低于 7mA,如果超过 10mA 未见,可认为阴性。

表 5 脊神经节段相对应的肌肉群

神经根	肌肉群
颈椎	C2-4 斜方肌、胸锁乳突肌
	C5-6 三角肌、肱二头肌
	C6-7 肱桡肌、桡侧腕屈肌
	C7-8 肱三头肌、尺侧腕伸肌
	C8-T1 拇短展肌、小指展肌
胸椎	T2-5 肋间肌
	T5-6 上腹直肌、肋间肌
	T7-8 中腹直肌、肋间肌
	T9-11 下腹直肌、肋间肌
	T12 腹直肌下缘、肋间肌
腰椎	L1-2 髂腰肌
	L2-3 股四头肌
	L3-4 膝关节
	L4-5 胫前肌、趾长伸肌
骶椎	S1-2 腓肠肌、比目鱼肌
	S2-4 肛门括约肌、尿道括约肌

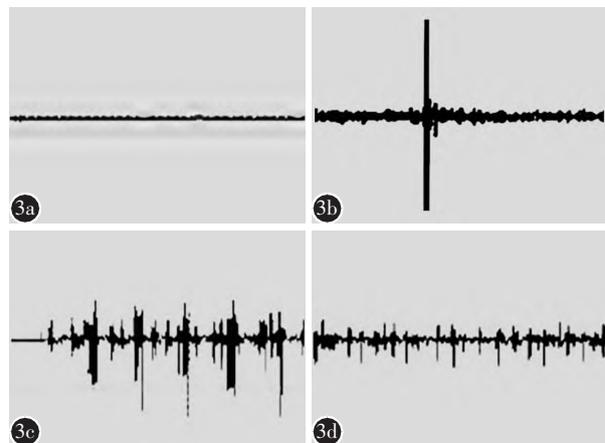


图 3 F-EMG 的 4 种肌电活动形式 a 正常静息状态下的肌电图 b 单个爆发性肌电活动 c 连续性肌电活动 d 自发性肌电活动。

级:B)。

5 IONM 过程中的麻醉管理

麻醉是影响脊柱手术 IONM 十分关键的因素,术中麻醉管理应该选择适宜于 IONM 监测的方案。

麻醉剂通过抑制突触和轴索的传导对诱发电位产生影响,麻醉剂量增加会导致 SEP 潜伏期延长,波幅下降。肌松剂对 SEP 无直接影响,反而可以抑制肌肉收缩所产生的杂波。在 SEP 的监测过程中,应尽量保持患者的生理参数和麻醉深度的稳定^[18,20]。

在麻醉插管诱导中使用的肌松药物会直接阻滞神经肌肉接头,导致 TceMEP 波幅消失。麻醉是影响 TceMEP 监测的重要因素,选用吸入性麻醉方案可能会明显抑制 TceMEP 的波幅,一般要求麻醉剂浓度低于 0.5% 或最低肺泡有效浓度 (minimal alveolar concentration, MAC) 值低于 0.7。实施 TceMEP 监测大多选用全静脉麻醉^[23,25-27]。

与 IONM 配合的麻醉管理,需要充分考虑麻醉的诱导与维持和不同麻醉药物的影响,还要注意生理指标调节。术中麻醉管理请参见表 6^[41-45]。

6 不同脊柱外科手术的 IONM 方案

多模态 IONM 是脊柱外科最有效的监测方案^[16,18,46-48]。在多模态 IONM 理念下,监测团队应当在手术前积极了解患者的基本情况(包括病史、查体、电生理检查、是否有禁忌证等),同时与手术团队共同探讨,预先制订合理的监测方案^[14]。本指南对不同脊柱外科手术的 IONM 方案提出原则性建议如下:

对于所有脊柱外科手术,若患者没有禁忌证,要求监测团队同时监测 SEP 和 MEP。(证据等级:A,推荐等级:A)整个手术过程中,监测团队应连续监测,测量并记录诱发电位由手术麻醉开始直至手术结束^[16,18,49]。当手术团队进行体位摆放、术前(麻醉后)、减压、牵引复位、放置融合器、内固定、截骨、矫形、病灶切除等风险操作时,监测团队必须时刻关注神经电生理信号的变化,并及时反馈。

在颈椎手术中,要求监测双侧上肢 SEP 和 MEP,建议同时监测四肢 SEP 和 MEP^[50-52]。在高风险的颈椎手术中,摆放体位时,可能发生颈髓损伤。因此,要求颈椎手术在摆放体位前后行电生理监测,根据监测结果判断是否存在颈髓损伤^[50,53,54]。(证据等级:A,推荐等级:B)

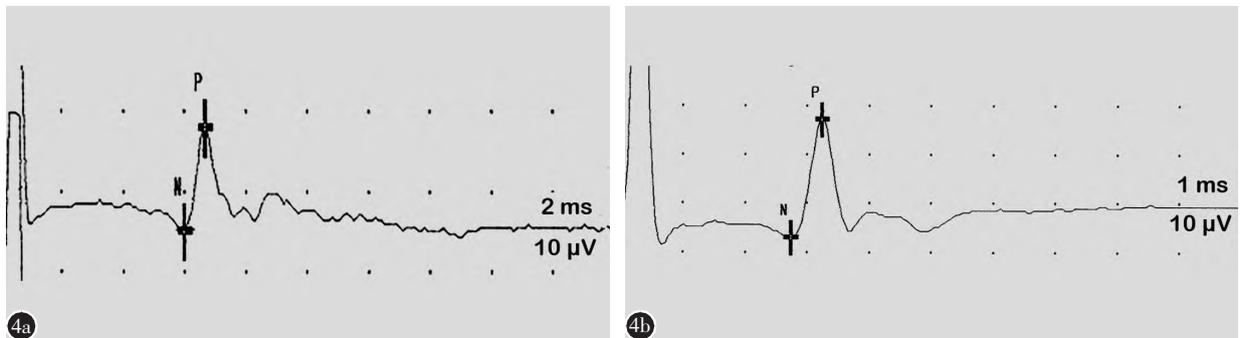


图 4 a 经颅电刺激后由脊髓圆锥处记录到的脊髓诱发电位(D波) b 经 T2 节段硬膜外刺激后由脊髓圆锥处记录到的脊髓诱发电位(SCEP)。

表 6 IONM 推荐麻醉方案

麻醉方案	
成人	麻醉诱导:常规给予镇痛镇静药物,如丙泊酚(1~2mg/kg)、芬太尼(2~3μg/kg)、舒芬太尼(0.02~0.06μg/kg)。气管插管时应用少量中短效肌松剂。 方案包括: (1)非去极化肌松药顺阿曲库铵(0.1~0.2mg/kg); (2)非去极化肌松药罗库溴铵 0.3mg/kg;或罗库溴铵 0.6~0.8mg/kg,需在手术监测关键阶前应用舒更葡糖钠 2mg/kg 快速逆转罗库溴铵的肌松作用 ^[43] ; (3)非去极化肌松药维库溴铵 0.10mg/kg; (4)非去极化肌松药阿曲库铵 0.5mg/kg。 麻醉维持:推荐全静脉麻醉方案(total intravenous/anaesthesia,TIVA),持续泵注丙泊酚 4~6mg/kg/h+瑞芬太尼 0.1~0.3μg/kg/min,或靶控输注(target controlled infusion,TCI)方案:丙泊酚(血浆浓度 3~4μg/ml)+瑞芬太尼(效应室浓度 4ng/mL)。
儿童	与成人麻醉方案不同,禁忌如下用药: (1)丙泊酚:2个月以下的儿童禁用。 (2)顺式阿曲库铵:1个月以下的儿童禁用。

在胸腰椎手术中,要求监测双下肢 SEP 和 MEP,需同时监测至少一侧上肢 SEP 和 MEP 作为对照参考^[20,55]。(证据等级:B,推荐等级:B)。

若术中需要评估神经根功能,监测团队需要加入肌电模态,并根据手术方案和肌肉—神经支配表决定肌肉的选择^[34,35]。对于部分需要判断脊髓功能的手术(如脊髓肿瘤、脊柱侧凸、脊髓型颈椎病等),有条件的监测团队可以加入 D 波或 SCEP 监测^[26,37]。

手术结束时,术中监测团队应提交规范化 IONM 报告,内容包括患者诊断、手术操作、IONM 监测方案、IONM 监测结果,要求报告术中有无异常变化及异常变化后处理结果。

7 IONM 异常的判断及应对措施

脊柱外科手术中采用多模态联合 IONM,术中任何一个模态的神经电生理信号出现异常,都应作为 IONM 异常进行处理。IONM 信号变化通常受到手术操作、麻醉因素、监测技术、人体生理参数、手术体位等因素的综合影响,手术医生、麻醉医生和电生理监测三个团队之间应充分沟通,才能及时有效排除假阳性和假阴性,提高监测的效能和手术治疗效果^[23,56]。团队应该在术前制订唤醒试验与检测技术结合的操作预案。IONM 出现异常报警后的处理原则包括以下步骤(证据等级:A,推荐等级:A)(表 7)^[38,57,58]:(1)监测团队首先排查因为监测技术原因造成的非手术因素假阳性报警,与麻醉团队合作排除麻醉药物和患者生理参数所造成假阳性报警,监测团队应及时保持与手术团队的沟通;(2)经过非手术因素排查后,仍存在神经电生理异常,监测团队应立即通知手术团队,配合排查手术操作形成的脊髓神经侵扰或损伤,实时监测神经电生理信号;(3)如果探查未发现异常产生原因,或所有应对措施均无效,考虑实施唤醒试验。如果唤醒试验无神经功能异常表现,通常认为手术操作是安全的。整个处理过程由手术医生做最后决定^[12,16]。建议每个 IONM 团队根据医院情况自行制定操作流程应对异常情况。处理流程可以参考规范化脊柱外科手术中神经电生理监测技术的专家共识^[18]。

8 IONM 临床风险、禁忌证及成本效益分析

IONM 为术者提供及时的神经功能监测信息,可及时发现脊髓或神经损伤,通过修正手术操作、有效预防术中脊髓或神经不可逆性损伤^[16,51,59]。IONM 在提高手术安全的同时也会带来额外的风险。术中 MEP 监测相关并发症比较罕见,有癫痫发作、心律失常、运动损伤、头皮烧伤、口腔咬伤等^[61,62]。在这些并发症中,咬伤的报道相对较多且常为自限性,其发生率

表 7 IONM 异常的处理原则

负责团队	处理原则
监护团队	<p>通知手术医生,建议暂停手术操作</p> <p>检查电极安置与连接,监护仪器状态和参数设定,排除技术因素造成的假阳性</p> <p>与麻醉团队合作,评估麻醉因素和患者术中生理参数变化的影响(如体温、平均动脉压 MAP、心率、血氧饱和度和出血量)</p> <p>与手术团队合作评估手术操作影响</p>
麻醉团队	<p>评估麻醉药影响,特别是肌松药的代谢情况,必要时使用肌松拮抗剂逆转</p> <p>评估麻醉深度(如生命体征和 BIS)的影响,必要时降低麻醉深度,或增加佐剂如低剂量氯胺酮的使用</p> <p>优化生理参数:</p> <p>(1)升高血压,MAP\geq60mmHg 或相对基线值升高 20%(建议 MAP\geq85mmHg)</p> <p>(2)维持良好的氧合、通气状态,维持呼气末二氧化碳(ETCO₂)为 35~40mmHg</p> <p>(3)检查血红蛋白(Hb)水平或红细胞压积(HCT),目标 Hb 大于 9~10g/dL 或 HCT>30%</p> <p>如采取以上措施后 IONM 结果依然没有改善,可由手术医生决定是否进行唤醒试验以排除假阳性结果。所有脊柱外科手术术前均需做好唤醒试验准备,具体方案如下:</p> <p>(1)诱导前跟患者讲述唤醒试验的过程并进行演练</p> <p>(2)唤醒试验前 30min 停用肌松药</p> <p>(3)唤醒试验前 5~10min 停用丙泊酚,但仍保持小剂量的瑞芬太尼泵入镇痛</p> <p>(4)唤醒试验开始,患者苏醒后根据指令性言语完成手指或者脚趾的运动</p> <p>(5)唤醒试验结束则恢复正常麻醉深度,直至手术结束</p>
手术团队	<p>暂停手术操作</p> <p>排查手术操作侵扰(如脊椎复位、脊髓神经减压或松懈,肿瘤切除,脊椎截骨,脊柱矫形过程中撑开、加压、去旋转,内固定或内置物置入不当,术中出血形成血肿等)</p> <p>针对排查结果进行纠正,在 IONM 监测下判断神经功能恢复</p> <p>如排查无果,出现持续性神经电生理信号异常,可选择唤醒试验</p>

为 0.14%~0.63%^[62-64]。实施 MEP 监测时,使用软质咬块及术中按时检查口腔可有效预防此类不良事件。MEP 刺激时,应事先告知术者,避免术区肌肉突然收缩而造成医源性损伤。在临床应用中,MEP 相对禁忌证包括癫痫、皮质病变、颅骨凸起缺陷、颅内压升高、心脏病、促惊厥药物或麻醉剂、心脏起搏器、深部脑刺激器、迷走神经刺激器、人工耳蜗等^[61]。通过严格规范操作,同时做好相应的预防措施,IONM 的获益大于监测本身的风险。(证据等级 B,推荐等级 B)

以脊柱侧凸矫形手术为例,国际脊柱侧凸研究会(scoliosis research society,SRS)在 1995 年的多中心调查中,严重脊髓损伤的发生率为 0.55%,但 SEP 监测可以发现并避免其中的 0.423%^[1],也就是说,术中监测可以防止近 80%的术中严重脊髓损伤。在颈椎手术过程中,MEP 可以有效防止与挽救 57%的神经损伤^[51]。基于系统性荟萃分析,脊柱外科手术的神经并发症约为 5.0%(95%CI,3.0%~7.0%)^[64]。临床研究发现,IONM 的神经损伤防范率为 52.4%(95%CI,37.3%~67.3%)^[51]。在临床工作中,受不同患者因素、手术室条件及监测医师经验等影响,IONM 具有一定的假阳性,但其假阴性罕见。因此,目前的 IONM 虽然不能绝对预测神经损伤的风险,但大量证据已表明 IONM 可以降低 40%~80%的术中神经损伤,特别是可以有效减少术后严重性神经损伤风险^[64-66]。IONM 可显著减少术中神经损伤,而经验丰富的监测团队可将神经功能损伤率大幅度降低,同时可以更大程度的降低持续性和严重的神经功能损伤^[1]。(证据等级:A,推荐等级:B)。

有数据显示,每例截瘫患者产生的社会经济成本都会远大于实施 IONM 的费用^[65],在很大程度上,节约了随后带来的医疗与护理费用^[64]。使用 IONM 可以极大减少术中唤醒的数量,避免术中唤醒带来的相关风险,节约麻醉用药,缩短手术和麻醉时间,提高手术效率;因此可以节省一定的直接医疗费用。实施 IONM 被证实可带来巨大的成本效益^[64-66]。医院管理部门在考核 IONM 成本效益和临床绩效时,应该全面、充分地评估 IONM 在脊柱外科手术中的花费与收益,所评估收益中务必顾及由于避免可能发生的医源性神经损伤所造成的巨大损失。(证据等级 B,推荐等级:B)。

9 小结

近年来,我国开展 IONM 的需求不断增加。国际上也在临床实践基础上,对脊柱外科 IONM 的规范化提出了新的要求。国外不同学术组织制订的 IONM 共识与指南,具有很好的参考价值,但需要结合国情。本指南是在汲取大量国内外 IONM 临床研究结果,对文献证据进行深入分析,结合我们的临床实践,在广泛征求大批专家意见的基础上,历经 1 年时间所制订。

脊柱外科 IONM 临床实践指南是开展术中监测的规范性和基础性文件,需要清醒地认识到 IONM 在努力避免术中神经功能损伤时,并不能完全杜绝脊柱外科术后神经并发症的发生,IONM 技术还在不断改进和提高过程中。本指南是一份纲领性规范文件,并未针对特定手术方式提供专门的监测技术。随着 IONM 临床应用与研究进一步发展,医学临床证据的大量收集与总结,可望针对不同的脊柱外科手术进行更加细化的 IONM 技术规范。另外,随着新型麻醉药物、新型监护器械、智能机器人技术以及数字远程医疗技术的不断发展,术中监护的新技术新方法,在取得可靠的科学依据及临床实践证明后,脊柱外科 IONM 的临床指南可能会更新,提供更准确的术中神经功能监测,为脊柱外科手术安全提供更好的保障。

10 参考文献

1. Nuwer MR, Dawson EG, Carlson LG, et al. Somatosensory evoked potential spinal cord monitoring reduces neurologic deficits after scoliosis surgery: results of a large multicenter survey[J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1995, 96(1): 6-11.
2. Dawson EG, Sherman JE, Kanim LE, et al. Spinal cord monitoring. Results of the scoliosis research society and the European Spinal Deformity Society Survey[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 1991, 16(8 Suppl): S361-364.
3. Hamilton DK, Smith JS, Sansur CA, et al. Rates of new neurological deficit associated with spine surgery based on 108,419 procedures[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(15): 1218-1228.
4. Reames DL, Smith JS, Fu KMG, et al. Complications in the surgical treatment of 19,360 cases of pediatric scoliosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(18): 1484-1491.
5. Nuwer MR. A new multicenter survey of neurologic deficits after spinal deformity surgery: are new models of intraoperative neurophysiologic monitoring less accurate[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2011, 28(6): 602-604.
6. Tamaki T. Intraoperative spinal cord monitoring: clinical overview. Spinal cord monitoring: basic principles, regeneration, pathophysiology, and clinical aspects[M]. Vienna: Springer Vienna, 1998. 509-520.
7. 陈耀龙, 杨克虎, 王小钦, 等. 中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022 版)[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(10): 697-703.
8. 蒋朱明, 詹思延, 贾晓巍, 等. 制订/修订《临床诊疗指南》的基本方法及程序[J]. *中华医学杂志*, 2016, 96(4): 250-253.
9. Society ACN. Guideline 4: standards of practice in clinical electroencephalography[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2006, 23(2): 105-106.
10. Kalkman CJ, Ten Brink S A, Been H D, et al. Variability of somatosensory cortical evoked potentials during spinal surgery effects of anesthetic technique and high-pass digital filtering[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 1991, 16(8): 924-929.

11. Zhang H, Venkatesha S, Minahan R, et al. Intraoperative neurological monitoring: continuous evoked potential signal extraction and analysis[J]. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 2006, 25(4): 39–45.
12. López JR, Ahn-Ewing J, Emerson R, et al. Guidelines for qualifications of neurodiagnostic personnel: a joint position statement of the American clinical neurophysiology society, the American association of neuromuscular & electrodiagnostic medicine, the American society of neurophysiological monitoring, and ASET-The neurodiagnostic society[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2023, 40(4): 271–285.
13. Sinha SR, Sullivan L, Sabau D, et al. American Clinical Neurophysiology Society guideline 1: minimum technical requirements for performing clinical electroencephalography[J]. *Neurodiagn J*, 2016, 33(4): 303–307.
14. Gertsch JH, Moreira JJ, Lee GR, et al. Practice guidelines for the supervising professional: intraoperative neurophysiological monitoring[J]. *J Clin Monit Comput*, 2018, 33(2): 175–183.
15. Dormans JP. Establishing a standard of care for neuromonitoring during spinal deformity surgery[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2010, 35(25): 2180–2185.
16. Nuwer MR, Emerson RG, Galloway G, et al. Evidence-based guideline update: intraoperative spinal monitoring with somatosensory and transcranial electrical motor evoked potentials[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2012, 29(1): 101–108.
17. Society ACN. Guideline 5: Guidelines for standard electrode position nomenclature[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2006, 23(2): 107–110.
18. 中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会脊柱外科神经电生理学组. 规范化脊柱外科手术中神经电生理监测技术的专家共识[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2019, 29(10): 944–954.
19. 王珏, 吴文忠. 术中神经生理监测的应用[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2017. 18–32.
20. Macdonald DB, Dong C, Quatralé R, et al. Recommendations of the International Society of Intraoperative Neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(1): 161–179.
21. Toleikis JR. Intraoperative monitoring using somatosensory evoked potentials[J]. *J Clin Monit Comput*, 2005, 19(3): 241–258.
22. Nuwer MR. Intraoperative monitoring of neural function Handbook of Clinical Neurophysiology[M]. USA: Elsevier B.V, 2008.
23. 胡勇, 沈慧勇. 脊柱外科手术中神经电生理监护[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2015. 21–27, 40–62, 141–145.
24. 陈裕光, 李佛宝. 脊柱外科神经监测技术与实例图析[M]. 广州: 广东科技出版社, 2018. 40–70, 118–130, 154–161.
25. Macdonald DB, Skinner S, Shils J, et al. Intraoperative motor evoked potential monitoring: a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring[J]. *Clin Neurophysiol*, 2013, 124(12): 2291–2316.
26. Legatt AD, Emerson RG, Epstein CM, et al. ACNS guideline: transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2016, 33(1): 42–50.
27. Kobayashi S, Matsuyama Y, Shinomiya K, et al. A new alarm point of transcranial electrical stimulation motor evoked potentials for intraoperative spinal cord monitoring: a prospective multicenter study from the Spinal Cord Monitoring Working Group of the Japanese Society for spine surgery and related research[J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 20(1): 102–107.
28. Takahashi M, Imagama S, Kobayashi K, et al. Validity of the alarm point in intraoperative neurophysiological monitoring of the spinal cord by the Monitoring Working Group of the Japanese Society for spine surgery and related research [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2021, 46(20): E1069–E1076.
29. Liu Q, Wang Q, Liu H, et al. Warning criteria for intraoperative neurophysiologic monitoring[J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2017, 30(5): 557–562.
30. Calancie B, Harris W, Broton JG, et al. “Threshold-level” multipulse transcranial electrical stimulation of motor cortex for intraoperative monitoring of spinal motor tracts: description of method and comparison to somatosensory evoked potential monitoring [J]. *J Neurosurg*, 1998, 88(3): 457–470.
31. Segura MJ, Talarico ME, Noel MA. A multiparametric alarm criterion for motor evoked potential monitoring during spine deformity surgery[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2017, 34(1): 38–48.
32. Szelényi A, Kothbauer KF, Deletis V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: Stimulation parameters and electrode montages[J]. *Clin Neurophysiol*, 2007, 118(7): 1586–1595.
33. 周琪琪, 张小锋. 神经监测技术在临床手术中的应用[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2005. 79–102.
34. Parker SL, Amin AG, Farber SH, et al. Ability of electromyographic monitoring to determine the presence of malpositioned pedicle screws in the lumbosacral spine: analysis of 2450 consecutively placed screws[J]. *J Neurosurg Spine*, 2011, 15(2): 130–135.
35. Ovadia D, Korn A, Fishkin M, et al. The contribution of an electronic conductivity device to the safety of pedicle screw insertion in scoliosis surgery[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(20): E1314–E1321.
36. Aatif MH. A practical approach to neurophysiologic intraoperative monitoring[M]. New York: DEMOS MEDICAL, 2014.
37. Tamaki T, Ando M, Nakagawa Y, et al. Intraoperative spinal cord monitoring: focusing on the basic knowledge of orthopedic spine surgeon and neurosurgeon as members of a team performing spine surgery under neuromonitoring[J]. *Spine Surg Relat Res*, 2021, 5(3): 120–132.

38. Ghadirpour R, Nasi D, Iaccarino C, et al. Intraoperative neurophysiological monitoring for intradural extramedullary spinal tumors: predictive value and relevance of D-wave amplitude on surgical outcome during a 10-year experience[J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 30(2): 259–267.
39. Ulkatan S, Neuwirth M, Bitan F, et al. Monitoring of scoliosis surgery with epidurally recorded motor evoked potentials (D wave) revealed false results[J]. *Clin Neurophysiol*, 2006, 117(9): 2093–2101.
40. Shigematsu H, Ando M, Kobayashi K, et al. Efficacy of D-wave monitoring combined with the transcranial motor-evoked potentials in high-risk spinal surgery: a retrospective multicenter study of the monitoring committee of the Japanese Society for Spine Surgery and related research[J]. *Global Spine J*, 2022, 13(8): 2387–2395.
41. Sloan TB, Heyer EJ. Anesthesia for intraoperative neurophysiologic monitoring of the spinal cord[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2002, 19(5): 430–443.
42. Lu IC, Lin IH, Wu CW, et al. Preoperative, intraoperative and postoperative anesthetic prospective for thyroid surgery: what's new [J]. *Gland Surg*, 2017, 6(5): 469–475.
43. 中华医学会儿科学分会临床药理学组,《中华儿科杂志》编辑委员会. 中国儿科超说明书用药专家共识[J]. *中华儿科杂志*, 2016, 54(2): 101–103.
44. Walker CT, Kim HJ, Park P, et al. Neuroanesthesia guidelines for optimizing transcranial motor evoked potential neuromonitoring during deformity and complex spinal surgery[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2020, 45(13): 911–920.
45. Sahinovic MM, Gadella MC, Shils J, et al. Anesthesia and intraoperative neurophysiological spinal cord monitoring[J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2021, 34(5): 590–596.
46. Sutter M, Eggspuehler A, Jeszenszky D, et al. The impact and value of uni- and multimodal intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) on neurological complications during spine surgery: a prospective study of 2728 patients[J]. *Eur Spine J*, 2018, 28(3): 599–610.
47. Tamkus AA, Rice KS, Mccaffrey MT. Perils of intraoperative neurophysiological monitoring: analysis of "false-negative" results in spine surgeries[J]. *Spine J*, 2018, 18(2): 276–284.
48. Thirumala PD, Huang J, Thiagarajan K, et al. Diagnostic accuracy of combined multimodality somatosensory evoked potential and transcranial motor evoked potential intraoperative monitoring in patients with idiopathic scoliosis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2016, 41(19): E1177–E1184.
49. Chang SH, Park YG, Kim DH, et al. Monitoring of motor and somatosensory evoked potentials during spine surgery: intraoperative changes and postoperative outcomes[J]. *Ann Rehabil Med*, 2016, 40(3): 470–480.
50. Takeda M, Yamaguchi S, Mitsuura T, et al. Intraoperative neurophysiologic monitoring for degenerative cervical myelopathy[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2018, 29(1): 159–167.
51. Funaba M, Kanchiku T, Yoshida G, et al. Efficacy of intraoperative neuromonitoring using transcranial motor-evoked potentials for degenerative cervical myelopathy[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2021, 47(1): E27–E37.
52. Buhl LK, Bastos AB, Pollard R J, et al. Neurophysiologic intraoperative monitoring for spine surgery: a practical guide from past to present[J]. *J Intensive Care Med*, 2020, 36(11): 1237–1249.
53. Melachuri SR, Balzer JR, Melachuri MK, et al. Risk factors for positioning-related somatosensory evoked potential changes in 3946 spinal surgeries[J]. *J Clin Monit Compu*, 2018, 33(2): 333–339.
54. Kamel I, Zhao H, Koch SA, et al. The use of somatosensory evoked potentials to determine the relationship between intraoperative arterial blood pressure and intraoperative upper extremity position: related neurapraxia in the prone surrender position during spine surgery: a retrospective analysis[J]. *Anesth Analg*, 2016, 122(5): 1423–1433.
55. Charalampidis A, Jiang F, Wilson JRF, et al. The use of intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery[J]. *Global Spine J*, 2020, 10(1_Suppl): S104–S114.
56. Vitale MG, Skaggs DL, Pace GI, et al. Best practices in intraoperative neuromonitoring in spine deformity surgery: development of an intraoperative checklist to optimize response[J]. *Spine Deform*, 2014, 2(5): 333–339.
57. 刘军辉, 王燕燕, 范顺武. 脊柱手术中神经电生理监护及其操作流程[J]. *中华骨科杂志*, 2016, 36(24): 1598–1605.
58. 中国医师协会神经外科医师分会神经电生理学组. 脊髓脊柱手术中神经电生理监测专家共识 (2022 版)[J]. *中华神经外科杂志*, 2022, 38(4): 329–335.
59. Kobayashi K, Imagama S, Yoshida G, et al. Efficacy of intraoperative intervention following transcranial motor-evoked potentials alert during posterior decompression and fusion surgery for thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2020, 46(4): 268–276.
60. Macdonald DB. Safety of intraoperative transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2002, 19(5): 416–429.

61. Yoshida G, Imagama S, Kawabata S, et al. Adverse events related to transcranial electric stimulation for motor-evoked potential monitoring in high-risk spinal surgery[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2019, 44(20): 1435-1440.
62. Schwartz DM, Sestokas AK, Dormans J P, et al. Transcranial electric motor evoked potential monitoring during spine surgery: is it safe[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(13): 1046-1049.
63. Tamkus A, Rice K. The incidence of bite injuries associated with transcranial motor-evoked potential monitoring[J]. *Anesth Analg*, 2012, 115(3): 663-667.
64. Ney JP, Van Der Goes DN, Watanabe JH. Cost-benefit analysis: intraoperative neurophysiological monitoring in spinal surgeries[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2013, 30(3): 280-286.
65. Sala F, Dvorak J, Faccioli F. Cost effectiveness of multimodal intraoperative monitoring during spine surgery[J]. *Eur Spine J*, 2007, 16(S2): 229-231.
66. Ament JD, Leon A, Kim KD, et al. Intraoperative neuromonitoring in spine surgery: large database analysis of cost-effectiveness[J]. *N Am Spine Soc J*, 2023, 14: 100206.

指南执笔人/通讯作者

胡勇(香港大学深圳医院 518053 深圳市 E-mail:huyong@hku-szh.org)

指南指导委员会(按姓氏汉语拼音排序)

乔慧(北京天坛医院 100068) 邱勇(南京鼓楼医院 210008) 张文智(香港大学深圳医院 518053) 仇建国(北京协和医院 100730)

指南制定专家组(按姓氏汉语拼音排序)

陈芝(广州医科大学附属第一医院 510120) 董健(复旦大学附属中山医院 200032) 杜启峻(香港大学深圳医院 518053) 高在芬(山东大学附属儿童医院 250022) 关日康(香港大学) 海涌(首都医科大学附属北京朝阳医院 100020) 何丽(宁夏银川国龙骨科医院 750003) 贺西京(西安国际医学中心医院 710100) 姜建元(复旦大学附属华山医院 200040) 蒋国强(宁波大学附属第一医院) 金翔(复旦大学附属华山医院 200040) 黎鸣(佛山市中医院 528099) 李危石(北京大学第三医院 100191) 李中实(中日友好医院 100029) 廖博(空军军医大学唐都医院 710032) 刘宝戈(北京天坛医院 100068) 龙厚清(深圳人民医院 518020) 鲁世保(首都医科大学宣武医院 100053) 陆声(云南省第一人民医院 650034) 罗卓荆(空军军医大学西京医院 710032) 马学晓(青岛大学附属医院 266000) 宁广智(天津医科大学总医院 300052) 牛强(香港大学深圳医院 518053) 齐华光(西安红会医院 710054) 瞿东滨(南方医科大学南方医院 510515) 阮狄克(解放军总医院第六医学中心 100048) 沈建雄(北京协和医院 100730) 盛伟斌(新疆医科大学第一附属医院 830054) 史本龙(南京鼓楼医院) 孙海峰(宁夏医科大学总医院 750004) 孙天胜(解放军总医院第四医学中心 100039) 陶惠人(香港大学深圳医院 518053) 王珏(江苏省中医院 210029) 王征(中国人民解放军总医院 100039) 伍骥(中国人民解放军空军特色医学中心 100142) 熊南翔(武汉大学中南医院 430000) 闫景龙(哈尔滨医科大学附属第二医院 150001) 殷国勇(江苏省人民医院 212028) 张宏其(中南大学湘雅医院 410028) 张玲菊(浙江省人民医院 314408) 赵斌(山西医科大学第二医院 030001) 郑召民(中山大学附属第一医院 510080) 朱锋(香港大学深圳医院 518053)

指南制订工作组(按姓氏汉语拼音排序)

曹锐(新疆医科大学第一附属医院 830054) 陈嘉成(中山大学附属第一医院 510080) 陈星宇(天津医科大学总医院 300052) 李佳良(西安红会医院 710054) 李广盛(广东医科大学附属医院 524013) 贲阳(西安红会医院 710054) 王树杰(北京协和医院 100730) 张雯(山东省立医院 250022) 赵永辉(云南省第一人民医院 650034)

指南审定专家(按姓氏汉语拼音排序)

冯世庆(山东大学第二医院 250033) 刘献增(北京大学国际医院 102206) 田东(复旦大学附属华山医院 200040)

(收稿日期:2024-04-18 修回日期:2024-08-04)

(本文编辑 姜雅浩)