

本文引用格式:陈治宇,于朝春.术中神经电生理监测在脊髓拴系综合征手术中的应用进展[J].安徽医学,2024,45(5):654-658.DOI:10.3969/j.issn.1000-0399.2024.05.025

· 综述 ·

## 术中神经电生理监测在脊髓拴系综合征手术中的应用进展

陈治宇 于朝春

**[摘要]** 脊髓拴系综合征(TCS)是一种由于脊髓受到异常牵拉而产生一系列临床症状和体征的症候群。术中神经电生理监测在TCS手术中发挥重要作用,可用于识别术中拴系部位附近的神经功能组织,并提供术中指导。体感诱发电位、运动诱发电位、肌电图、球海绵体反射4个模态作为术中神经电生理监测的主要方式,可以有效的缩短手术时间、降低复杂拴系手术的风险,还能减少或避免甚至预防神经损伤,从而提高患者的安全性。

**[关键词]** 脊髓拴系综合征;术中神经电生理监测;多模态神经监测

doi:10.3969/j.issn.1000-0399.2024.05.025

脊髓拴系综合征(tetheredcordsyndrome, TCS)是指非弹性组织牵制脊髓末端引起脊髓纵向牵拉、圆锥低位,从而发生病理改变,产生神经功能障碍和畸形的综合征。患者通常表现为进行性下肢疼痛、感觉与运动功能障碍、膀胱直肠功能障碍及下肢畸形等症候<sup>[1-2]</sup>,且易留下后遗症。解拴手术是目前首选治疗方案,早期手术解拴可以阻止疾病的进展,甚至可以逆转已有的神经症状<sup>[3-4]</sup>。然而如脂肪瘤一类的复杂型TCS手术通常较为困难,预后较差<sup>[5]</sup>。且TCS的手术主要在椎管内,容易损伤神经,过去常采用局麻手术或全麻术中唤醒方法,但这些方法增加了手术风险和患者的痛苦,且不适用于儿童<sup>[6]</sup>。术中神经电生理监测(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)技术作为一项新兴的技术可用于识别拴系部位附近的神经功能组织,并提供术中指导。它依据神经系统的电化学信息传导性,通过监测电传导信号来实时评估神经通路的完整性,降低医源性损伤风险,并协助麻醉医生进行生命体征管理、麻醉药物的选择及剂量的调整<sup>[7-8]</sup>。该技术可以及时反映脊髓或神经系统的功能状态,且利于手术过程中的后续管理,以便手术医生采取补救措施<sup>[9]</sup>。它显著提高了手术完全解拴率,不仅确保患者手术期间安全,还减少了术后并发症,改善了症状<sup>[10]</sup>。本文对现阶段IONM技术的主要监测模式类型及其在TCS术中的联合使用,以及影响监测结果的因素进行综述,为充分认识及利用该技术提供帮助。

### 1 IONM技术监测模式类型

目前,IONM技术在TCS手术中的运用已逐渐完善,涉及多种监测模式,主要监测模式包含体感诱发电位(somatosensory evoked potential, SEP)监测模式、运动诱发电位(motor evoked po-

tential, MEP)监测模式、自发肌电图(free electromyography, free EMG)监测模式和诱发肌电图(triggered electromyography, triggered EMG)监测模式,以及近几年出现的球海绵体括约肌反射(bulbocavernosussphincter reflex, BCR)等辅助监测手段<sup>[11]</sup>。

1.1 SEP监测模式 SEP监测模式最初用于脊柱侧凸手术<sup>[12]</sup>,目前广泛应用于切除脊髓病变<sup>[13]</sup>。它通过重复刺激周围神经,记录患者脊髓和体感觉皮层的反应来评估感觉通路的完整性,还可用于判断组织的机械应力和脑血流的供应是否充足<sup>[14]</sup>。TCS手术中最可能损伤下腰椎和骶神经根,因此通常监测双下肢SEP,且至少监测1个上肢SEP,以排除手术操作外,麻醉、体温和技术故障对SEP的影响。

按照国际10-20系统的标准,采用针电极或螺旋电极刺激上肢正中神经和下肢胫后神经,上肢从C3-Fz-C4-Fz记录,下肢从Cz-Fz记录<sup>[15]</sup>。且SEP波幅和潜伏期的改变有助于定位神经系统中的病变,SEP波幅的降低或消失及潜伏期的延长代表了从外周部位(即正中神经或胫后神经)延伸到脑干或大脑皮层的神经元通路中断。通常认为波幅下降超过50%或潜伏期延长超过10%为感觉障碍的警告信号<sup>[16]</sup>。SEP的显著恶化或丢失可能表明相应的后根、圆锥或脊髓内的背柱通路受损。然而并非每一次波幅的降低都表明感觉障碍,需要电生理师结合实际情况进行判断。若术中SEP突发明显恶化,则不需要等待50%的波幅下降,电生理师可直接提醒术者<sup>[15]</sup>。

多项研究表明SEP监测模式在术中定位及持续监测感觉通路和邻近神经系统结构方面的有效性<sup>[17-19]</sup>。SEP对术后神经功能评估有高精度性和高有效性的特点,其监测术后神经感觉功能受损的准确率高达90%,评估神经功能情况有效率高达78%~100%。然而,SEP模式也存在很多不足,譬如胫后神经SEP只监测脊髓背侧的感觉神经通路,因此无法发现运动通路的损伤,

基金项目:上海市虹口区“国医强优”三年行动计划(编号:HKGYQYXM-2022-14),芍药苷对脊髓拴系大鼠脊髓神经元自噬及NOTCH表达水平影响的研究(编号:HKQGYQY-ZYY-2022-02)

作者单位:201203 上海 上海中医药大学市中西医结合临床医学院(陈治宇)

200082 上海 上海中医药大学附属市中西医结合医院神经外科(陈治宇,于朝春)

通信作者:于朝春, yuchaochun2006@hotmail.com

且术中 SEP 监测信号有延迟,会使预警时间滞后,导致医源性神经损伤<sup>[20]</sup>,此外,由于每次刺激会激活多个神经根,SEP 监测模式还不能评估单个神经根的损伤<sup>[15]</sup>。

**1.2 MEP 监测模式** MEP 是记录刺激大脑内下行运动通路引起的肌肉运动复合电位。它可以监测整个运动系统,并可单独评估四肢,防止术中意外损伤脊髓<sup>[21]</sup>。在脊髓手术中,该模式有 2 种标准监测方法,包括刺激四肢引起的经颅肌肉运动诱发电位(muscle MEPs, mMEPs)和在脊髓表面直接测量的经颅脊髓运动诱发电位(direct wave, D 波)<sup>[22]</sup>。因为 D 波的硬膜外电极通常放置在 T10-T11 水平,无法监测圆锥-骶尾区手术,因此 TCS 手术中通常只选用 mMEPs 监测模式。然而 Kothbauer 等<sup>[23]</sup>认为 D 波是反映术后长期运动功能的最佳预测指标,它可以连续监测皮质脊髓侧束以识别可逆性损伤,并通过警报使术者及时做出术中调整。认为 mMEPs 的波形消失仅预示着术后运动功能下降,只有当 D 波也消失时,运动能力才会永久丧失。mMEPs 的变化与术后神经功能相关<sup>[19,24]</sup>,mMEPs 波幅下降超过 50% 可能预示术后短期的运动障碍<sup>[15]</sup>。但据报道,只要存在连续的 mMEPs(即使幅度大大降低)就可认为预后良好;mMEPs 不可逆的消失表明下运动神经元完全损伤,术后运动功能几乎无法恢复<sup>[14]</sup>。

mMEPs 与 D 波均采用经颅磁或电刺激来激发,监测 mMEPs 通过选定肌肉,插入并固定皮下针电极来记录,通常选择股四头肌监测 L3-L4 水平,胫骨前肌监测 L4-L5 水平,外展拇肌或腓肠肌监测 S1-S2 水平,肛门括约肌监测 S2-S4 水平<sup>[25]</sup>。可以根据手术的具体情况,增加非手术累及区域肌肉的 mMEPs 作为对照以排除非手术因素的影响。按照国际 10-20 系统标准,以较低的刺激强度传递单个脉冲。监测 D 波除了使用经颅刺激电极外,还必须放置单独的下游脊柱电极监测皮质脊髓侧束<sup>[26-28]</sup>。出于安全考虑,5 岁以下儿童不建议使用 MEP 监测。

TCS 手术中 MEP 波幅或形态的变化具特异性<sup>[25]</sup>。通常将 MEP 波幅降低超过 50% 及潜伏期延迟 10% 作为神经根损伤的警报标准。Finger 等<sup>[29]</sup>认为,运动神经根更容易识别和保护,因此使用 MEP 监测的患者术后运动功能恢复更好。但由于 MEP 的可变性较大,没有足够证据表明术中 MEP 的波幅和/或潜伏期改变与术后运动功能障碍成线性相关<sup>[14]</sup>。且肌肉反应易受麻醉和神经肌肉阻滞影响,因此 MEP 也同样易受影响。因为多神经根可支配同一肌肉,因此 MEP 同 SEP 一样,无法检测到单个神经根损伤<sup>[30]</sup>。

**1.3 EMG 监测模式** EMG 监测是 IONM 技术中用于 TCS 手术中最常见的监测模式<sup>[31]</sup>,分为 2 种模式:自由肌电(Free EMG)和诱发肌电(Triggered EMG)。Free EMG 提供实时信息;Triggered EMG 通过电生理师输入信号主动刺激来反馈信息。二者通过记录神经、肌肉的生物电活动来评估被监测肌肉的外周神经、脑神经和脊神经根的功能,弥补了 MEP 监测对特定神经根损伤的敏感性较低的缺点。二者均可与 SEP 监测或 MEP 监测联合使用,以提高手术的特异性<sup>[21]</sup>。在术前确定患者下肢情况,选取合适的肌肉来监测更有助于术中评估。因为 TCS 的手术较容易损伤 S2-S4 及阴部神经,因此通常加用肛门括约肌监测<sup>[32]</sup>。

Free EMG 通过连续记录术中肌肉群的自发活动,实时反映

肌肉的生理或病理活动。其通常为静止状态,但切断运动神经根也会使其静止,因此静止并不一定表明神经完整。通常认为高频(50~300 Hz)、持续、长时间爆发的信号为警报标准<sup>[15]</sup>。当手术操作结束后,仍存在活动信号可能预示着潜在的神经损伤。因 Free EMG 具有低特异性、高敏感性的特点,若出现不规则的瞬态信号,电生理师应及时与术者沟通排除手术操作引起的牵引、压迫神经根等刺激因素<sup>[25]</sup>。

Triggered EMG 通过使用探针刺激器进行电刺激并记录肌肉的肌电图信号。通常选用双极同心圆探刺激器,因其诱导较少的电流扩散到附近组织,可以产生更好的特异性。术中通过有目的地刺激判断该部位是否为神经组织,也可在术野范围内定位运动神经。该监测模式可以使手术做到最大限度地解拴,同时减少对功能性神经组织的损伤。通常刺激强度在 0.5~2 mA 时产生肌电图反应。而在更高强度(高达 10 mA)下无反应则可排除刺激部位存在神经组织<sup>[33]</sup>。Gloria 等<sup>[15]</sup>认为,由于 TCS 手术严重依赖 Triggered EMG 监测,为避免假阴性,应通过 4 次以上试验排除该部位存在神经、肌肉阻滞。

由于 EMG 具有高敏感性和低特异性的特点<sup>[10]</sup>,术中应联合 IONM 的其他指标进行解释,当检测到异常肌电图活动时,电生理师应立即发出警报,与术者进行沟通<sup>[15]</sup>。

**1.4 BCR 监测模式** Deletis 等<sup>[34]</sup>在 1997 年首次提出了 BCR 监测的概念,并由 Rodi 等<sup>[35]</sup>于 2001 实施。BCR 是通过电刺激阴茎背侧或阴蒂神经引起的同侧反应,通常从肛门括约肌记录。由于在 TCS 手术中最易损伤腰骶部神经导致膀胱和直肠功能障碍<sup>[36]</sup>,但 SEP 和 MEP 仅可对该区域神经系统的感觉和运动功能进行监测,因此有学者提出在 TCS 手术中使用 BCR 的观点。它可以监测阴部的自主和反射控制区域从而评估阴部神经(运动神经和感觉神经)和 S2-S4 脊髓节段的功能完整性,以预防排尿及性功能障碍。BCR 的变化对预测术后排尿功能具有高度特异性,如果 BCR 信号持续存在,术后 6 个月的排尿率约为 90%<sup>[37]</sup>。

由于表面电极可能会受到高阻抗的影响,因此 BCR 的监测在儿童中实施具有一定困难。但有研究在儿童中成功监测了 BCR,这证明了在儿童中使用 BCR 具有可行性<sup>[38-39]</sup>。此外,监测 BCR 在预测儿童 TCS 术后 6 个月排尿能力方面特异性为 88%<sup>[37]</sup>,因此,术中监测 BCR 对儿童来说也很重要。

目前 BCR 监测的预警标准仍然存在争议。Sala 等<sup>[40]</sup>提出将波幅降低超过基线 75% 作为警报标准,他认为术中 BCR 消失提示下骶段损伤,术后可能出现暂时的膀胱功能障碍,但会随着时间的推移而好转。中国医师协会神经外科医师分会神经电生理学组则将 BCR 波形消失作为警报标准<sup>[22]</sup>。然而 BCR 波幅的存在并不能保证尿括约肌功能完整。但目前还没有更有效代表尿括约肌或肠道功能的神经信号的方法。BCR 监测与括约肌控制、括约肌-逼尿肌协同能力及性功能的相关性仍需进一步研究<sup>[15]</sup>。

**1.5 多模态 IONM 的使用** IONM 技术在 TCS 手术中的指导意义显著,但各种监测方式的应用价值又不尽相同。因此,多模态联合使用 IONM 可降低假阴性的风险,从而提高准确性。由于神经支配重叠,反映上行肌肉神经元通路的 SEP 和反映下行运动神经传递的 MEP 联合监测方式目前已被常规使用<sup>[41-42]</sup>,这有助于发现单个神经根损伤。Azad 等<sup>[43]</sup>的临床观察显示,联合

SEP、MEP在TCS手术中取得了良好的临床效果:背部疼痛改善100%,腿部疼痛改善100%,肌肉无力改善85%,膀胱功能障碍改善50%。且术后未见神经功能恶化。由于任何的IONM指标持续异常均表明术后两年预后较差,所以多种监测方式联合使用的多模态IONM更有助于了解患者的预后情况,利于症状改善<sup>[44-45]</sup>。根据Ide等<sup>[46]</sup>的相关报道,术中运用多模态IONM可明显降低神经功能损害的发生率。Shinjo等<sup>[38]</sup>表明在多模态IONM指导下进行的TCS手术的短期复发率为4.2%,永久性发病率为0%。在大多数研究中<sup>[47-50]</sup>,多模态IONM的特异性、敏感性通常超过80%。

## 2 影响电生理监测结果的因素

术中主要影响监测结果的因素包括麻醉方案、患者年龄、生命体征情况、生物电干扰和一些术中操作等<sup>[51]</sup>。

**2.1 麻醉因素** 麻醉是影响MEP监测的首要因素,因此监测MEP通常使用全静脉麻醉(total intravenous anesthesia, TIVA)。异丙酚作为TIVA的一种,虽可降低SEP和MEP的波幅,延长其潜伏期,但影响较小;依托咪酯对监测SEP和MEP有利,可用于基线波幅较低的患者。肌松药作用于神经肌肉接头,可显著抑制MEP,因此理想情况下术中除诱导麻醉插管外不添加肌松药,若有条件监测肌松程度,可持续少量输注肌松药,以达到理想肌松水平并保证MEP监测稳定<sup>[52]</sup>。阿片类药物对IONM几乎无影响,可作为IONM合适的麻醉方案<sup>[53]</sup>,但大剂量瑞芬太尼[大于 $8\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ ]会抑制SEP,因此应尽量控制用量<sup>[52]</sup>。吸入麻醉药可剂量依赖性降低SEP和MEP波幅,延长潜伏期。但因其使用方便,可小剂量维持(0.3~0.5MAC)使用,但基线较差的患者或既往有神经系统疾病的老年患者中应尽量避免使用。若手术时间较长的患者则应考虑静吸复合麻醉(全麻),对于不适用全麻的儿童来说,可首选小比例的挥发性气体,但需要严格控制浓度。

**2.2 年龄因素** 年龄对IONM的影响也尤为显著<sup>[54]</sup>。研究显示MEP的成功率在7岁以下组为55.0%,在7岁以上组为70.2%<sup>[55]</sup>。婴儿的皮层和皮层下运动系统的不成熟可能会导致刺激阈值增加,幼儿的运动皮层通常比成人的位置更靠前,因此应根据患者年龄选择合适的电极位置<sup>[56]</sup>。

**2.3 其他因素** 除上述主要因素外,一般生命体征对IONM也有影响,应该严格控制。有研究称体温每下降 $1^{\circ}\text{C}$ ,SEP潜伏期增加3%,波幅下降7%;平均血压下降超过60mmHg会导致SEP消失<sup>[53]</sup>。生物电干扰和术中操作(使用双极刺激器、电刀、超声吸引器、冲水、钝性解剖等)是IONM中最常见的干扰波来源,通过适当的麻醉方案可去除患者生物电对EMG的干扰,但术中操作对目前IONM设备监测的干扰是无法避免的,因此在术中进行可能会干扰IONM的操作时暂停监测可有助于减轻影响,但在关键区域的手术操作会降低持续监测的价值<sup>[57]</sup>。

## 3 小结与展望

综上所述,在TCS解拴手术中使用IONM可明显缩短手术时间,使全身情况较差、麻醉风险高的患者也可以进行手术,还可减少复杂拴系手术的风险,从而预防患者的神经功能缺损,有助于受损脊髓和神经的恢复,提高了患者的安全性,且预后较

好。然而IONM结果很大程度上取决于电生理师的反馈及术者的判断,因此必须依靠专业电生理师及手术团队,以防出现数据的延迟或误判。

目前大多数研究均为单中心回顾性研究,存在样本量不足、高风险手术患者使用IONM的频率更高的缺点,且很少有关于IONM对TCS患者手术方案或随访的有效性的研究,这可能导致一定的偏倚。除了手术技术之外,显微手术器械的升级、手术疗效的评价及预防和控制感染等方面也可能产生偏差。关于未来的研究应选择多机构的随机、前瞻性对照试验,并对TCS患者手术方案或随访进行充分研究。此外,随着相关生物医学工程的发展和对神经生理学的深入研究,将出现更定量、客观的监测方式。

## 参考文献

- [1] MUALEM W, NATHANI K R, DURRANI S, et al. Utilizing pre- and postoperative radiological parameters to predict surgical outcomes following untethering for tethered cord syndrome in a pediatric population[J]. *Neurosurg Pediatr*, 2022, 31(2): 159-168.
- [2] ELMESALLAMY W, ABDALWANIS A, MOHAMED S. Tethered cord syndrome: surgical outcome of 43 cases and review of literatures[J]. *Egypt J Neurosurg*, 2019, 34(1): 1-9.
- [3] LIU M, DENG W, LU Y Y, et al. Surgical treatment of tethered cord syndrome showed promising outcome in young children with short duration[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2023, 27(5): 1831-1836.
- [4] EDSTROM E, WESSLEN C, FLETCHER-SANDERSJOO A, et al. Filum terminale transection in pediatric tethered cord syndrome: a single center, population-based, cohort study of 95 cases[J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2022, 164(6): 1473-1480.
- [5] 邹敏刚, 罗德芳, 冯开明, 等. 导航联合神经电生理监测在脊髓拴系外科松解术中的应用[J]. *当代医学*, 2020, 26(1): 1-5.
- [6] 姜刚毅, 董伊隆, 杨国敬, 等. 多模式电生理监测在脊柱手术中的意义及进展[J]. *温州医学院学报*, 2012, 42(4): 402-405, 409.
- [7] 叶红, 徐冠华, 陈黎敏. 神经电生理监测在脊柱侧凸矫形手术中的应用[J]. *中国骨与关节杂志*, 2018, 7(6): 445-448.
- [8] 韦善文, 杨方玉, 梅昕. 脑电图在脊柱手术中神经电生理监测中的作用[J]. *中国现代医药杂志*, 2021, 23(12): 17-21.
- [9] 刘永胜, 赵宇. 术中神经电生理监测在胸椎管狭窄症外科治疗中的应用进展(英文)[J]. *Chin Med Sci J*, 2017, 32(4): 260-264.
- [10] POURATIAN N, ELIAS W J, JANE J A J R, et al. Electrophysiologically guided untethering of secondary tethered spinal cord syndrome[J]. *Neurosurg Focus*, 2010, 29(1): E3.
- [11] 文海韬, 王潜阳, 陈小燕, 等. 多模式神经电生理监测在儿童脊髓拴系松解术中的应用价值研究[J]. *临床小儿外科杂志*, 2020, 19(9): 830-836.
- [12] BROWN R H, NASH C L J R. Current status of spinal cord

- monitoring[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*,1979,4(6):466-470.
- [13] SCHWARTZ D M, AUERBACH J D, DORMANS J P, et al. Neurophysiological detection of impending spinal cord injury during scoliosis surgery[J]. *J Bone Joint Surg Am*,2007, 89 (11):2440-2449.
- [14] SARNTHEIN J, KRAYENBUHL N, ACTOR B, et al. Intraoperatives neurophysiologisches monitoring verbessert das outcome in der neurochirurgie [intraoperative neurophysiological monitoring improves outcome in neurosurgery] [J]. *Praxis (Bern 1994)*,2012,101(2):99-105.
- [15] GALLOWAY G, SALA F. Mapping and monitoring of tethered cord and cauda equina surgeries [J].*Handb Clin Neurol*, 2022,186:257-270.
- [16] MURPHY B, MURPHY E, IRWIN J, et al. Review of the role of intraoperative neurophysiological monitoring in spinal surgery with a focus on the true and false positives and a clinical correlation[J]. *Int J Spine Surg*,2022,16(3):548-553.
- [17] SIMON M V , CHIAPPA K H, BORGES L F. Phase reversal of somato-sensory evoked potentials triggered by gracilis tract stimulation :case report of a new technique for neurophysiologic dorsal columnmapping[J]. *Neurosurgery*, 2012, 70 (3):E783-E788.
- [18] NAIR D, KUMARASWAMY V M, BRAVER D, et al. Dorsal column mapping via phase reversal method: the refined technique andclinical applications[J]. *Neurosurgery* , 2014,74 (4): 437-446;discussion 446.
- [19] MACDONALD D B, DONG C, QUATRALE R, et al. Recommendations of the international society of intraoperative neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials[ J]. *Clin Neurophysiol*,2019,130(1):161-179.
- [20] SKINNER S A, NAGIB M, BERGMAN T A, et al. The initial use of free-running electromyography to detect early motor tract injury during resection of intramedullary spinal cord lesions[J]. *Neurosurgery*,2005,56(2 Suppl):299-314.
- [21] MURENA L, COLIN G, DUSSI M, et al. Is intraoperative neuromonitoring effective in hip and pelvis orthopedic and trauma surgery? a systematic review[J].*J Orthop Traumatol*, 2021,22(1):40.
- [22] 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.
- [23] KOTHBAUER K F, DELETIS V, EPSTEIN F J. Motor-evoked potential monitoring for intramedullary spinal cord tumor surgery: correlation of clinical and neurophysiological data in a series of 100 consecutive procedures[J].*Neurosurg Focus*,1998,4(5):e1.
- [24] LIN W, XU H, DUAN G, et al. Spine-shortening osteotomy for patients with tethered cord syndrome: a systematic review and meta-analysis [J].*Neurol Res*,2018,40(5):340-363.
- [25] KIM K. Intraoperative neurophysiology monitoring for spinal dysraphism[J].*J Korean Neurosurg Soc*,2021,64(2):143-150.
- [26] ANDO M, TAMAKI T, MAIO K, et al. The muscle evoked potential after epidural electrical stimulation of the spinal cord as a monitor for the corticospinal tract: studies by collision technique and double train stimulation[J].*J Clin Monit Comput*,2022,36(4):1053-1067.
- [27] PANG D. Surgical management of complex spinal cord lipomas: how, why, and when to operate. a review[J]. *J Neurosurg Pediatr*,2019,23(5):537-556.
- [28] OLMSTED Z T, RYU B, PHAYAL G, et al. Direct wave intraoperative neuromonitoring for spinal tumor resection: a focused review[J].*World Neurosurg X*,2023,17:100139.
- [29] FINGER T, AIGNER A, DEPPERICH L, et al. Secondary tethered cord syndrome in adult patients: retethering rates, long-term clinical outcome, and the effect of intraoperative neuromonitoring[J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2020, 162(9): 2087-2096.
- [30] SALA F, KRZAN M J, DELETIS V. Intraoperative neurophysiological monitoring in pediatric neurosurgery: why, when, how? [J]. *Childs Nerv Syst*,2002,18(6-7):264-287.
- [31] KHEALANI B, HUSAIN A M. Neurophysiologic intraoperative monitoring during surgery for tethered cord syndrome [J]. *J Clin Neurophysiol*,2009,26(2):76-81.
- [32] RAIZADA V, MITTAL R K. Pelvic floor anatomy and applied physiology[J].*Gastroenterol Clin North Am*,2008,37(3): 493-509, vii.
- [33] PRATHEESH R, BABU K S, RAJSHEKHAR V. Improvement in intraoperative transcranial electrical motor-evoked potentials in tethered cord surgery: an analysis of 45 cases [J]. *Acta Neurochir (Wien)*,2014,156(4):723-731.
- [34] DELETIS V, VODUSEK D B. Intraoperative recording of the bulbocavernosus reflex[J]. *Neurosurgery*, 1997, 40(1): 88-92; discussion 92-93.
- [35] RODI Z, VODUSEK D B. Intraoperative monitoring of the bulbocavernosus reflex: the method and its problems[J].*Clin Neurophysiol*,2001 , 112(5):879-883.
- [36] SAPIR Y, BUZAGLO N, KORN A, et al. Dynamic mapping using an electrified ultrasonic aspirator in lipomyelomeningocele and spinal cord detethering surgery—a feasibility study [J]. *Childs Nerv Syst*,2021,37(5):1633-1639.
- [37] CHA S, WANG K C, PARK K, et al. Predictive value of intraoperative bulbocavernosus reflex during untethering surgery for post-operative voiding function[J]. *Clin Neurophysiol*, 2018,129(12):2594-2601.
- [38] SALA F, SQUINTANI G, TRAMONTANO V, et al. Intraoperative neurophysiology in tethered cord surgery: techniques and results[J]. *Childs Nerv Syst*,2013,29(9):1611-1624.
- [39] SHINJO T, HAYASHI H, TAKATANI T, et al. Intraopera-

- tive feasibility of bulbocavernosus reflex monitoring during untethering surgery in infants and children[J]. *J Clin Monit Comput*,2019,33(1):155-163.
- [40] MOROTA N. Intraoperative neurophysiological monitoring of the bulbocavernosus reflex during surgery for conus spinal lipoma: what are the warning criteria?[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2019,22:1-9.
- [41] VERLA T, FRIDLEY J S, KHAN A B, et al. Neuromonitoring for intramedullary spinal cord tumor surgery[J]. *World Neurosurg*, 2016,95:108-116.
- [42] BOYD S G, ROTHWELL J C, COWAN J M, et al. A method of monitoring function in corticospinal pathways during scoliosis surgery with a note on motor conduction velocities[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*,1986,49(3):251-257.
- [43] IDE K, HASEGAWA T, YAMATO Y, et al. Spinal shortening osteotomy for adult tethered cord syndrome evaluated by intraoperative ultrasonography[J]. *J Orthop Sci*, 2021, 26(3): 363-368.
- [44] HSU W, BETTEGOWDA C, JALLO GI. Intramedullary spinal cord tumor surgery: can we do it without intraoperative neurophysiological monitoring?[J]. *Childs Nerv Syst*,2010,26(2):241-245.
- [45] CHATAIN G P, KORTZ M W, SERVA S, et al. Long-term neurologic outcome after spinal ependymoma resection with multimodal intraoperative electrophysiological recording: cohort study and review of the literature[J]. *Neurospine*,2022,19(1):118-132.
- [46] YENER S, THOMAS D T, HICDONMEZ T, et al. The effect of untethering on urologic symptoms and urodynamic parameters in children with primary tethered cord syndrome[J]. *Urology*, 2015,85(1):221-216.
- [47] AZAD T D, PENDHARKAR A V, NGUYEN V, et al. Diagnostic utility of intraoperative neurophysiological monitoring for intramedullary spinal cord tumors: systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Spine Surg*,2018,31(3):112-119.
- [48] RIJS K, KLIMEK M, SCHELTENS-DE BOER M, et al. Intraoperative neuromonitoring in patients with intramedullary spinal cord tumor: a systematic review, meta-analysis, and case series[J]. *World Neurosurg*,2019,125:498-510.e2.
- [49] KIMCHI G, KNOLLER N, KORN A, et al. Delayed variations in the diagnostic accuracy of intraoperative neuromonitoring in the resection of intramedullary spinal cord tumors [J]. *Neurosurg Focus*,2021,50(5):E21.
- [50] CHARALAMPIDIS A, JIANG F, WILSON J R F, et al. The use of intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery[J]. *Global Spine J*,2020,10(1 Suppl):104S-114S.
- [51] WANG A C, THAN K D, ETAME A B, et al. Impact of anesthesia on transcranial electric motor evoked potential monitoring during spine surgery: a review of the literature[J]. *Neurosurg Focus*,2009,27(4):E7.
- [52] 蒋欣余,刘玲,唐晓宁.麻醉药物对脊柱手术神经电生理监测影响的研究进展[J]. *现代临床医学*,2022,48(2):144-148.
- [53] KIM D S, CHOI H Y, KIM G W, et al. Differences in electrophysiologic values between preoperative and intraoperative neurophysiologic monitoring[J]. *Turk Neurosurg*, 2021,31(1): 51-58.
- [54] LIEBERMAN J A, LYON R, FEINER J, et al. The effect of age on motor evoked potentials in children under propofol/isoflurane anesthesia[J]. *Anesth Analg*,2006,103(2):316-321, table of contents.
- [55] CHEN X, STERIO D, MING X, et al. Success rate of motor evoked potentials for intraoperative neurophysiologic monitoring: effects of age, lesion location, and preoperative neurologic deficits[J]. *J Clin Neurophysiol*,2007,24(3):281-285.
- [56] RIVET D J, O'BRIEN D F, PARK T S, et al. Distance of the motor cortex from the coronal suture as a function of age[J]. *Pediatr Neurosurg*, 2004,40(5):215-219.
- [57] ZIELINSKI P, FURTAK J. Influence of intraoperative neurophysiologic monitoring on the development of surgical dissection techniques[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2012, 9(6): 571-575.

(2023-07-17收稿)

(本文编校:闵敏,张迪)