

神经电生理监测在神经外科手术中的应用价值

彭紫薇,唐振刚

摘要 神经外科手术充满风险,术中电生理监测技术,实时监测神经系统功能完整性,被认为是降低脑缺血性神经功能损伤发生率极其重要的辅助手段。但由于目前用于术中监测的预警标准的灵敏度、特异度尚偏低,术后仍有部分假阳性、假阴性病例存在,影响术中外科医生操作及术后患者预后转归。为此,探索脑组织缺血耐受神经电生理监测新方案,完善预警标准,对给予手术医生个体化的指导具有重要价值。

关键词 神经电生理;术中监测;神经外科;预警标准

中图分类号 R741;R741.044 **文献标识码** A **DOI** 10.16780/j.cnki.sjssgncj.20210175

本文引用格式:彭紫薇,唐振刚.神经电生理监测在神经外科手术中的应用价值[J].神经损伤与功能重建,2022,17(11):645-649.

作者单位

湖北医药学院附属

十堰市人民医院

湖北 十堰 442000

收稿日期

2021-02-26

通讯作者

唐振刚

tzgrmyy@163.com

国内术中神经电生理监测(intraoperative neurophysiologic monitoring, IONM)是伴随精准医疗的开展,于20世纪70年代被引进的一种新的术中辅助技术,最先用于前庭神经鞘瘤术中保护面听神经,随后在面肌痉挛和三叉神经痛微血管减压术、后颅窝肿瘤切除术、脑血管病以及癫痫和立体定向手术中逐渐开展。IONM将成为精准医疗的必备技术之一,但受过专业培训的人员并不多,目前尚未在全国推广开来^[1]。

1 神经外科术中监测技术

神经外科术中监测技术主要包括两类,一类是以血管内血流参数为基础的数字减影血管造影、吲哚菁绿血管造影、经颅多普勒超声、热弥散血流测定、CT血管造影等,可显示手术部位血管解剖形态学和脑血流动力学变化,但无法在整个手术中持续监测脑功能状态;另一类主要是以各种不同神经电生理信号变化为基础的脑电图(electroencephalogram, EEG)、肌电图(electromyogram, EMG)、诱发电位(evoked potentials, EPs)等,在不干扰手术进行和额外增加手术创伤及复杂程度的同时,有效提示手术医生局部脑血流变化及脑功能状态,及时调整术中操作和麻醉参数,更受青睐。

IONM的应用提高了外科医生在中枢神经系统处于危险状态时做出手术决策的能力,其作用主要包括两个方面,监测功能和定位功能。据手术涉及部位及手术方案的不同,术中监测方式各异,其中体感诱发电位(somatosensory evoked potential, SEP)和运动诱发电位(motor evoked potential, MEP)应用较多。SEP可实时监测皮质血流是否足够,对大脑皮质缺血更为敏感,而MEP则可提示小穿支动脉受损造成的运动功能障碍,监测皮质下缺血更有优势^[2]。因此,二者联合使用,互为补充,可提高预警的有效性。

2 麻醉对 IONM 的影响

SEP和MEP均受麻醉药物影响,静脉麻醉药较

吸入性麻醉药的影响小^[3]。其中吸入性麻醉药抑制皮质信号导致SEP潜伏期延长和振幅减少与剂量相关,静脉麻醉药丙泊酚、芬太尼等对降低SEP的波幅、延长潜伏期的作用要温和一些。MEP对麻醉更敏感,容易被吸入性麻醉消除,神经肌肉阻滞药对MEP也有影响,但静脉麻醉药对MEP的影响较小。有文献指出,为评估静脉注射不同剂量丙泊酚对MEP的影响,将目标丙泊酚静脉输注浓度倍增至上限时将引起MEP波幅部分降低,但是不会消失。脑干听觉诱发电位(brain stem auditory evoked potential, BAEP)受麻醉药影响很小,神经肌肉阻滞药对其也没有影响^[4]。EEG易受麻醉药影响而产生伪像,不同麻醉药表现差异很大,需要鉴别。麻醉药对肌肉反应影响很小,但神经肌肉阻滞药对其影响显著,监测EMG要避免使用。术中为防止患者肢体运动,通常需使用部分神经肌肉阻滞药,用药前与麻醉医师良好沟通,确保完成手术、麻醉的同时尽可能减少对EMG监测的影响。另外,无论使用吸入性麻醉还是静脉麻醉,保持恒定的麻醉浓度都很重要。大剂量给药或急剧调整药物浓度可导致诱发电位显著改变,必须与潜在的神经元损伤区分开^[5]。

3 IONM 在神经外科的具体应用

3.1 脑动脉瘤显微夹闭术

脑动脉瘤夹闭术中使用SEP和MEP是实时监测急性缺血性脑卒中及再灌注成功与否的安全可行的方法。SEP对大脑皮质缺血更敏感,可实时监测皮质血流是否足够;MEP对监测皮质下缺血,尤其是损伤小穿支动脉造成的运动功能障碍更有优势,但各有不足^[2]。Brittany等^[6]强调使用多模式IONM的重要性,一个模式错过的缺血事件可能被另一个模式发现。脑动脉瘤显微夹闭术后出现神经功能损伤,主要是由于皮质或皮质下缺血导致。所以,目前术中主要以SEP监测为主,MEP监测为辅,既降低了患者术后皮质以及皮质下缺血的可

率,又为术中临时阻断载瘤动脉的安全时限提供了参考依据。对于形状不规则、瘤颈宽大的动脉瘤,临时阻断载瘤动脉可改变动脉瘤内血流动力学,瘤内压力骤减,触诊搏动减弱,瘤壁皱缩,降低了脑动脉瘤术中再次破裂出血的风险,有利于动脉瘤颈塑形并完全夹闭^[7]。此时,MEP为主要的监测手段,其振幅降低大于50%以及刺激阈值的增加是术中停止动脉临时阻断的主要依据。Komatsu等^[8]研究表明在临时阻断载瘤动脉过程中,MEP可能显示出与永久性脑血管损伤相似的异常波形,但MEP振幅的降低更多是由于暂时性载瘤动脉闭塞引起,而并非永久性损伤导致。所以,当术中判断MEP改变的原因时,不可忽略临时阻断载瘤动脉的影响。Greve等^[9]研究表明MEP可预测缺血性脑卒中患者血运重建过程中运动通路是否缺血及临床结局,为外科医生术中判断是否存在脑组织缺血提供了一个重要信息,并可及时干预。在脑动脉瘤夹闭术中,解除临时阻断血流再灌注期间,如果MEP没有恢复,则表明残留的脑灌注不良可能会影响运动通路功能的恢复,有助于判断载瘤动脉临时阻断后再通的风险和益处。此外,在颈动脉内膜剥脱术(carotid endarectomy,CEA)中也面临颈内动脉临时阻断问题,术中联合SEP和MEP保证了更少的技术故障,减少手术和麻醉时间,并且可以减少分流的风险和发生率^[10]。

3.2 前庭神经鞘瘤术中面、听神经保护

BAEP已被广泛使用于前庭神经鞘瘤手术中关于听力保护。BAEP记录来自同侧耳的刺激反应,对肿瘤体积较大、导致脑干受压而不能正常记录同侧听力的患者,可记录对侧BAEP作为脑干功能的测量指标。但是,术中BAEP监测主要有两个局限性,检测费时,并且前庭神经鞘瘤会妨碍听神经元的传导。在21世纪初,一种新型的术中监测听力功能的方法被开发出来,即耳蜗背核动作电位(dorsal cochlear nucleus action potential,DNAP)^[11]。在DNAP监测中,电极位于脑干的背侧耳蜗核上,其在监测电信号方面具有很高的灵敏度,并且可以检测被BAEP忽略的信号^[11]。此外,有学者指出术中耳蜗神经动作电位(cochlear nerve action potential,CNAP)监测可用于小前庭神经鞘瘤(<15 mm)患者,保护耳蜗神经功能的效果也得到认可,因为肿瘤小到足以允许将记录电极放置在耳蜗之间的耳蜗神经上^[12]。Ishikawa等^[12]研究表明在CNAP监测下,可以确定神经鞘瘤位置,在保留耳蜗神经的功能下完全切除肿瘤。即CNAP被证明对于识别耳蜗神经的位置极为有用。在前庭神经鞘瘤术中面神经监测方面,EMG应用较广泛,但它无法实现连续监测,术中仅有EMG反应差不能作为术后长期面神经功能差的可靠预测指标。为克服这一限制,最近有学者提出了一个新的监测方式,即面神经根出口区的复合肌肉动作电位。外科医生可以在肿瘤切除过程中获得关于面神经功能状态的连续定量数据,预警更及时和准确。前庭神经鞘瘤术中联合面神经根出口的复合动作电位和DNAP持续监测可最大程度地保留患者听力和面神经功能,预防术后听力减退及面神经麻痹。此外,一些学者报道,对于岩斜区膜瘤切除术中也可以采用BAEP监测听神经的功能,其中Ⅲ波潜伏期和V波波幅的改变似乎对预测

岩斜区膜瘤切除术患者发生听觉功能障碍的风险具有高度的敏感性和特异性,可用于确定最大切除率并保留听神经功能^[13]。

3.3 面肌痉挛微血管减压术

异常肌肉反应(abnormal muscle reaction,AMR)是微血管减压术(microvascular decompression,MVD)中为保护面神经功能常用的监测方法。Zhang等^[14]等研究表明术前接受其他治疗的患者,再次接受MVD治疗时,术后缓解率不会降低,并且患侧的CMAP幅度低于健康侧。所以无论术前是否接受过其他治疗,MVD辅以IONM,均行之有效。术中通过电刺激面神经的一个分支引发AMR,并从面神经的其他分支支配的肌肉中记录下来,从而指导手术的进行。解除责任血管对面神经根的压迫,大部分患者的AMR会消失,恢复压迫后,AMR重新出现。因此,在MVD期间行AMR监测可以帮助确定责任血管,特别是存在多个责任血管时,有助于确认面神经与责任血管间置入垫片后的面神经减压效果,从而确认手术效果。Li等^[15]的研究中记录了93例面肌痉挛患者术前的AMR,当在面神经表面和后颅窝神经之间切开硬脑膜或蛛网膜时,19例患者AMR消失,分离面神经根出口区中的责任血管并放置适当垫片后,67例患者AMR消失。这一现象可能是当硬脑膜或蛛网膜被切断时,脑脊液的释放改变了桥小脑角区脑脊液的流体力学,局部压力降低,压迫得到一定程度的缓解,但只有完全解除面神经根压迫,大多数患者AMR才会消失。注意,在手术过程中,AMR消失提示手术成功是一个充分条件,而不是必要条件。在一项关于MVD治疗面肌痉挛时AMR早期永久消失的回顾性临床研究中,Jiang等^[16]指出早期AMR消失的原因可能是神经血管压迫程度不严重,并且在手术过程中移动责任血管并不困难,这些患者通常术后立即治愈的机会更大。当行MVD前AMR显示永久消失时,应继续进行电生理监测,并且应更加小心,从而设法获得足够的减压,保障手术的成功。最近还有文献报道指出如果仅使用较小范围的刺激强度来判断AMR是否消失,则可能会忽略其他一些不常见的AMR变化模式。因此,为了更精确地预测,术中应当尝试不同的刺激强度以明确引起AMR的阈值,确保减压效果^[17]。此外,目前临床上外科治疗原发性三叉神经痛也常规行MVD,IONM对手术医生的操作起到一定警示作用,可提高MVD效果并减少术后遗症。

3.4 癫痫及立体定向手术

癫痫手术治疗主要为切除引起癫痫发作的脑组织,该手术的主要难点在于准确定位病理性脑组织,这部分脑组织被称为癫痫发作区。术中EEG可在致痫灶周围或更广的区域内监测到发作间期棘波,为了减少癫痫复发,必要时切除致痫灶及其周围部分脑组织。但有学者报道指出部分患者因切除致痫灶后仍有一些残存的棘波,在切除致痫灶周围组织后,EEG仍能监测到发作间期的棘波,说明这些残存的棘波与手术预后无明显相关性,所以切除所有棘波灶没有必要,反而会增加术后神经功能缺损的机率^[18]。由此可见皮质脑电图的作用有限。有学者提出于癫痫发作区及周围植入颅内电极数天,以便有足够时间记录自发性癫痫颅内脑电图(intracranial electroencephalogram,

IEEG),但耗时长、成本高,并可能会导致患者不适和潜在并发症,尚未普及^[19]。此外,在接受手术切除的患者中,约半数患者在5年内出现癫痫复发。可能与当前用于定位手术切除组织的金标准是肉眼观察发作记录确定的,存在一定的误差。近年,Varatharajah等^[20]报道了一种基于人工智能的方法来预测癫痫发作区,仅使用癫痫发作间期的数据。这项技术通过临床收集的82例耐药癫痫患者的发作间期IEEG数据得到验证。其研究结果表明,大约2 h的记录时间足以定位癫痫发作区,但尚未普及临床。立体定向手术主要为丘脑底核深部脑刺激(deep brain stimulation, DBS)治疗帕金森病(Parkinson's disease, PD)^[21]。虽然自90年代以来DBS已用于临床,但其如何改善PD运动症状的机制尚未完全阐明。刺激电极的最佳放置仍是一个挑战,可能是由于丘脑底核感觉运动区域内的神经解剖学变异所致,有待进一步的研究为可能的临床应用提供依据^[22]。

3.5 脊髓手术、脊柱手术、脊髓栓系手术

IONM在脊柱手术过程中可通过监测关键神经结构的功能完整性,将手术控制在安全范围内。根据病灶定位分别进行MEP、SEP和EMG等多项监测技术。EPs可用于评价脊髓肿瘤导致的运动和感觉通路的功能损害,锥体束的传导可通过经颅电刺激或清醒患者的磁刺激来评估。对于髓外肿瘤,Harel等^[23]研究表明其IONM的敏感性、特异性、阳性预测值和阴性预测值分别为75%、100%、100%和97%,表明IONM预测神经功能缺损具有较高的准确性,在预防新的神经缺陷方面发挥了一定作用。对于髓内肿瘤,IONM的使用有助于肿瘤的完全切除,并有学者指出联合使用D波在预测髓内肿瘤术后功能缺损方面比单独使用SEP和MEP具有更高的准确性^[24]。此外,一项关于术前SEP潜伏期延长与术中SEP变化和术后运动功能恶化(postoperative motor dysfunction, PMD)相关性研究指出术前SEP有助于预测脊髓肿瘤切除术中SEP的显著变化,而术中SEP的显著变化是术后4周持续PMD的唯一危险因素^[25]。另外,对于各种脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)的患者,术前对损伤程度进行标准评估至关重要。传统的行为评估方法Basso-Beattie-Bresnahan(BBB)评分是主观的,容易受到人为因素的影响。另一方面,诸如SEP之类的神经电生理监测是一种客观的评估方法,可连续进行纵向研究。有学者指出SEP和BBB方法均提供了独特而有价值的信息并且彼此互补,建议同时纳入SCI研究中,可更有效地评估损伤进展^[26]。目前研究表明SEP对运动功能监测的特异性虽高,但敏感性较低,术中监测需要一定的叠加时间,不能即刻反映脊髓功能状态,影响医生术中判断,而MEP是通过刺激运动皮质来观察皮质脊髓束传导,对于各种危及到运动通路和神经根的风险操作,均可即刻预警并预测预后。所以,当前大多数学者认为SEP与MEP联合监测用于急性SCI手术中效果最佳^[27]。此外,脊髓硬膜外电刺激(epidural electrical stimulation, EES)已被证明可恢复SCI后慢性麻痹的运动功能,可用于临床^[28]。对于脊柱功能性疾病,MEP、SEP、EMG和脊髓EPs也常用到。例如,在脊髓型颈椎病手术中,MEP和EMG对减少术后神经根麻痹具有重要作用^[29]。

在儿童痉挛性脑性瘫痪患者单节段选择性背侧神经根切断术中,神经根切断的标准完全依赖于EMG的解释,可最大限度地降低新运动或括约肌功能恶化的风险,并提高了神经功能恢复速度^[30]。对于椎体骨折、脱位再复位,以及脊柱侧凸矫形手术等,IONM可及时发现潜在的神经损伤,预防可能发生的后遗症,并且术后患者脊柱恢复正常生理状态通常可以恢复神经电生理信号,提示手术成功^[31,32]。在脊髓栓系手术中IONM安全有效,术后恶化的风险低至2.9%,大多数患者可避免长期进展^[33]。但在脊髓动静脉畸形和髓内海绵样血管畸形切除术中联合IONM术后仍出现不少假阳性和假阴性结果提示IONM不能预测患者的全部功能^[34],提醒术者IONM在脊柱脊髓疾病诊疗策略中虽然发挥重要作用,但不可忽略可能被遗漏的神经功能损伤。采用多模态IONM监测,可同时兼顾运动传导通路和感觉传导通路、神经根和脊髓,更全面地监测术中神经功能变化,以最大限度地提高诊断效能,并提供一个安全范围,以改善脊柱手术的结果。

3.6 脑功能区唤醒手术

目前,术中脑功能区定位有多种方法,如:神经导航、皮质神经电刺激、MEP、SEP、术中唤醒麻醉等。清醒状态对大脑皮质和皮质下施行直接电刺激是术中推断大脑功能区的技术,可识别涉及复杂功能的皮质区域和皮质下通路,特别是运动、感觉、语言和认知功能。在一项系统研究中,共分析了来自17项研究2 351例胶质瘤患者,其结果表明术中皮质神经电刺激可准确定位功能区皮质及纤维束,评估胶质瘤切除范围,有效降低甚至避免功能区病变手术中出现神经功能缺失并发症的概率,大大缩短术后住院以及康复时间^[35]。但对于存在语言障碍的患者,术中直接皮质电刺激精确定位语言功能区仍很困难^[36]。皮质-皮质诱发电位(cortico-cortical evoked potential, CCEP)则反映没有患者配合情况下,单相脉冲刺激对语言皮质所引起的双向反应,较皮质电刺激具有更高的灵敏度和特异性,定位更加理性和客观^[37]。此外,为消除任何不确定因素的影响,有研究机构开发了一种术中言语功能监视器,可有效地执行语言功能测试,具有一定临床应用价值,但尚未进行定量评估^[38]。对于运动功能区的定位,除了采用直接皮质电刺激,MEP也具有一定价值。Zhang等^[39]研究中指出术中唤醒配合MEP监测定位中央沟切除运动区胶质瘤,术后肿瘤切除完全,未遗留运动功能障碍。对于邻近视觉传导通路的肿瘤,术中联合直接皮质电刺激和视觉诱发电位(visual evoked potential, VEP),可评估视觉功能病变部位及严重程度,但在维持后视路功能完整性方面的价值可能有限^[40]。对于空间认知的保护,有学者指出术中清醒状态下同步皮质及皮质下电刺激监测中执行线段等分任务是唤醒术中定位与保护患者空间认知功能,最大程度减少术后空间忽视症状的有效方法^[41]。在最近的一项研究中,对于一些特殊功能区监测也有相关报道。例如,与音乐演奏相关的功能皮质位于颞上回后部和边缘上回^[42]。Camporeze等^[43]研究指出唤醒术中联合EEG与皮质电刺激,可几乎完全切除病灶,术后未遗留与音乐演奏相关功能障碍。此外,一项前瞻性单中心研究评估了虚

拟现实头盔(virtual reality helmet, VRH)在接受清醒开颅术和直接电刺激脑成像患者中的耐受性和安全性,其结果表明在唤醒术中让患者沉浸在一个虚拟的环境中并与患者互动是可能的,这为定位复杂的认知功能区开辟了新的技术领域,有待进一步研究^[44]。另外,术中保障患者麻醉安全也至关重要。唤醒术一般包括两种情况,整个手术过程均保持清醒,或在开颅阶段全身麻醉,在脑内手术阶段保持清醒,据具体医疗条件和患者情况进行选择。总之,良好的心理准备,合理的麻醉技术和药物选择,以及良好的团队沟通是手术成功的关键因素。

3.7 慢性意识障碍患者的评估

EEG或EPs监测对早期识别和诊断患者慢性意识障碍可提供除神经影像学之外的有效信息,对危重患者的诊疗决策具有一定影响。André-Obadia等^[45]建议对慢性意识障碍的患者进行EEG、SEP、BAEP等多种电生理监测评估,避免单一检查的局限性,但应考虑个体之间的巨大差异。EEG被认为是评估脑功能状态独特且最佳的方法,可在床边重复进行并实现连续监测,是识别昏迷患者脑部分可逆性损伤的关键步骤,例如癫痫持续状态或代谢性脑病^[46]。据最近的一项Meta分析指出,大约15%临床无行为反应的脑损伤患者通过EEG检查时发现大脑隐蔽的意识迹象,并与患者较好的长期预后相关^[46]。SEP可评估危重患者感觉通路的功能完整性,多项研究表明缺乏N20成分(皮质反应的丧失)在预测慢性意识障碍患者不良预后方面提供了有力证据^[45]。双侧SEP的缺失预测缺氧性脑损伤不良预后的特异性接近100%,循证医学建议作为B级证据来评估缺氧缺血性脑病的预后^[47]。BAEP可评估听觉和脑干结构的功能完整性,其信号改变与慢性意识障碍患者的预后不良相关,有助于预测觉醒。但文献证据表明,BAEP的预测效用比SEP的要低,在预测不良神经系统预后方面的应用仍然有限^[48]。在因周围神经或颈脊髓损伤而导致正中神经失用无法监测SEP的情况下尤其有用,还可评估枕叶皮质功能状态,这是对SEP评估的补充^[45]。神经电生理检查除可早期发现并监测患者意识障碍的进展,也具有一定的治疗作用。在一项关于脊髓刺激(spinal cord stimulation, SCS)治疗不同程度慢性意识障碍患者对改善其意识水平和运动功能的研究中,发现5 Hz的SCS可增加患者脑血流量,引起上肢肌肉抽搐,患者上肢感觉和运动功能较下肢明显恢复,即表明SCS可能是一种新的神经调节和神经康复技术,慢性意识障碍患者可能是SCS治疗的良好候选者^[49]。另外,在一项前瞻性队列研究中,Connolly等^[50]收集某些临床事件相关电位(event related potentials, ERPs),即对听觉、视觉或触觉刺激的瞬间EEG反应,其目的是开发一个自动程序,从ERPs和静息状态EEG中提取与预后显著相关的信号,作为一个准确的预后指标,但临床应用尚需进一步完善。

4 总结与展望

未来IONM的研究应致力于改进监测技术和优化预警标准,以检测任何即将发生的神经损伤,提高其监测质量的敏感性和特异性。IONM的监测质量受患者的体温、血压以及全身麻

醉的深度和类型等多个因素的影响,尽管监测设备和麻醉技术的最新进展极大地提高了IONM的可靠性和准确性,但IONM信号的突然变化通常很难准确解释。麻醉师对于识别和纠正术中可控的、对监测造成影响的危险因素起着非常重要的作用,对于预防神经系统损伤和保障神经系统手术安全至关重要。在回顾了最近的文献后发现,这些研究调查了IONM在神经外科、脊柱外科等多种领域的应用,涉及血管、肿瘤以及各种功能区域手术中的效用。目前,尽管关于哪些患者和哪种疾病最能受益于IONM以及哪种特定方式的监测能提供最佳诊断和改善预后,各种文献存在争议,但任何神经电生理信号的突然变化都应立即做出应对措施,及时恢复信号并保持神经功能的完整性。尽管当前的IONM模式对神经外科手术和麻醉可能增加了成本、术中更长的手术时间以及术后出现的假阳性或假阴性结果,但笔者认为IONM可改善大多接受神经外科手术患者的预后,其潜在益处大于许多潜在弊端。

参考文献

[1] Zhou J, Wang Y, Wang D, et al. Endovascular Treatment for Ruptured Aneurysms at Distal Cerebral Arteries[J]. World Neurosurg, 2019, 123: 387-392.

[2] 张申起, 郭丽蕊, 彭彬, 等. 术中神经电生理监测在神经外科中的应用[J]. 卒中与神经疾病, 2018, 25: 614-619.

[3] MacDonald DB, Dong C, Quatralle R, et al. Recommendations of the International Society of Intraoperative Neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials[J]. Clin Neurophysiol, 2019, 130: 161-179.

[4] Garrido LC, Schwarz K, Lauss K, et al. Comparison of a Traditional and Novel Evoked Compound Action Potentials Recording Approach and Evoked Auditory Brainstem Responses in Pediatric Cochlear Implants Users[J]. J Int Adv Otol, 2018, 14: 353-358.

[5] Tanaka R, Tanaka S, Ichino T, et al. Differential effects of sevoflurane and propofol on an electroretinogram and visual evoked potentials[J]. J Anesth, 2020, 34: 298-302.

[6] Staarmann B, O'Neal K, Magner M, et al. Sensitivity and specificity of intraoperative neuromonitoring for identifying safety and duration of temporary aneurysm clipping based on vascular territory, a multimodal strategy[J]. World Neurosurgery, 2017, 100: 522-530.

[7] Shojima M, Morita A, Kimura T, et al. Computational fluid dynamic simulation of a giant basilar tip aneurysm with eventual rupture after Hunterian ligation[J]. World Neurosurg, 2014, 82: 535. e5-e9.

[8] Komatsu K, Mikami T, Yokoyama R, et al. Electrophysiological influence of temporal occlusion of the parent artery during aneurysm surgery[J]. J Clin Neurosci, 2017, 45: 199-204.

[9] Greve T, Wagner A, Ille S, et al. Motor evoked potentials during revascularization in ischemic stroke predict motor pathway ischemia and clinical outcome[J]. Clin Neurophysiol, 2020, 131: 2307-2314.

[10] Marinò V, Aloj F, Vargas M, et al. Intraoperative neurological monitoring with evoked potentials during carotid endarterectomy versus cooperative patients under general anesthesia technique: a retrospective study[J]. J Neurosurg Anesthesiol, 2018, 30: 258-264.

[11] Nakatomi H, Miyazaki H, Tanaka M, et al. Improved preservation of function during acoustic neuroma surgery[J]. J Neurosurg, 2015, 122: 24-33.

[12] Ishikawa M, Kojima A, Terao S, et al. Cochlear Nerve Action Potential Monitoring for Preserving Function of an Unseen Cochlear Nerve in Vestibular Schwannoma Surgery[J]. World Neurosurg, 2017, 106: 1057. e1-e7.

[13] Lepski G, Arévalo A, Roser F, et al. Electrophysiological predictors of hearing deterioration based on AEP monitoring during petroclival meningioma resection[J]. Neurosurg Rev, 2020, 37: 1-9.

- [14] Zhang WB, Min LZ, Zhong WX, et al. Surgical effect and electrophysiological study of patients with hemifacial spasm treated with botulinum toxin or acupuncture before microvascular decompression[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2019, 184: 105417.
- [15] Li Z, Gao J, Wang T, et al. Retrospective clinical analysis of 320 cases of microvascular decompression for hemifacial spasm[J]. Medicine, 2018, 97: e11825.
- [16] Jiang C, Xu W, Dai Y, et al. Early permanent disappearance of abnormal muscle response during microvascular decompression for hemifacial spasm: a retrospective clinical study[J]. Neurosurg Rev, 2017, 40: 479-484.
- [17] Zhu W, Sun C, Zhang Y, et al. AMR monitoring in microvascular decompression for hemifacial spasm: 115 cases report[J]. J Clin Neurosci, 2020, 73: 187-194.
- [18] Kim SM, Kim SH, Seo DW, et al. Intraoperative neurophysiologic monitoring: basic principles and recent update[J]. J Korean Med Sci, 2013, 28: 1261-1269.
- [19] Marcellino CR, Lapalme-Remis S, Rabinstein AA, et al. Cortical surface intracranial electrodes identify clinically relevant seizures missed on scalp EEG after traumatic intracranial hemorrhage[J]. Epileptic Disord, 2018, 20: 551-556.
- [20] Varatharajah Y, Berry B, Cimbalnik J, et al. Integrating artificial intelligence with real-time intracranial EEG monitoring to automate interictal identification of seizure onset zones in focal epilepsy[J]. J Neural Eng, 2018, 15: 046035.
- [21] Kostoglou K, Michmizos KP, Stathis P, et al. Classification and prediction of clinical improvement in deep brain stimulation from intraoperative microelectrode recordings[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2016, 64: 1123-1130.
- [22] Campbell BA, Machado AG, Baker KB. Electrophysiologic mapping for deep brain stimulation for movement disorders[J]. Handb Clin Neurol, 2019, 160: 345-355.
- [23] Harel R, Schleifer D, Appel S, et al. Spinal intradural extramedullary tumors: the value of intraoperative neurophysiologic monitoring on surgical outcome[J]. Neurosurg Rev, 2017, 40: 613-619.
- [24] Cannizzaro D, Mancarella C, Nasi D, et al. Intramedullary spinal cord tumors: the value of intraoperative neurophysiological monitoring in a series of 57 cases from two Italian centres[J]. J Neurosurg Sci, 2019.
- [25] Park J, Cho YE, Park M, et al. Correlation between preoperative somatosensory evoked potentials and intraoperative neurophysiological monitoring in spinal cord tumors[J]. J Clin Monit Comput, 2021, 35: 979-991.
- [26] Ali AH, Al Nashash H, Mir H, et al. Characterization of transection spinal cord injuries by monitoring somatosensory evoked potentials and motor behavior[J]. Brain Res Bull, 2020, 156: 150-163.
- [27] Li QX, Zhao XJ, Li XN, et al. Application of intraoperative electrophysiological monitoring in vertebral canal decompression surgery for acute spinal cord injury[J]. J Int Med Res, 2020, 48: 0300060520924205.
- [28] Calvert JS, Grahm PJ, Strommen JA, et al. Electrophysiological guidance of epidural electrode array implantation over the human lumbosacral spinal cord to enable motor function after chronic paralysis[J]. J Neurotrauma, 2019, 36: 1451-1460.
- [29] Zileli M, Borkar SA, Sinha S, et al. Cervical Spondylotic Myelopathy: Natural Course and the Value of Diagnostic Techniques-WFNS Spine Committee Recommendations[J]. Neurospine, 2019, 16: 386-402.
- [30] De Vloot P, Huttunen TJ, Forte D, et al. Intraoperative electrophysiology during single-level selective dorsal rhizotomy: technique, stimulation threshold, and response data in a series of 145 patients[J]. J Neurosurg Pediatr, 2020, 25: 597-606.
- [31] Phillips JH, Palmer RC, Lopez D, et al. The recognition, incidence, and management of spinal cord monitoring alerts in early-onset scoliosis surgery[J]. J Pediatr Orthop, 2017, 37: 581-587.
- [32] Appel S, Korn A, Biron T, et al. Efficacy of head repositioning in restoration of electrophysiological signals during cervical spine procedures[J]. J Clin Neurophysiol, 2017, 34: 174-178.
- [33] Fekete G, Bognár L, Novák L. Surgical treatment of tethered cord syndrome—comparing the results of surgeries with and without electrophysiological monitoring[J]. Childs Nerv Syst, 2019, 35: 979-984.
- [34] Li X, Zhang HQ, Ling F, et al. Differences in the electrophysiological monitoring results of spinal cord arteriovenous and intramedullary spinal cord cavernous malformations[J]. World Neurosurg, 2019, 122: 315-324.
- [35] Suarez-Meade P, Marenco-Hillebrand L, Prevatt C, et al. Awake vs. asleep motor mapping for glioma resection: a systematic review and meta-analysis[J]. Acta Neurochir, 2020, 162: 1709-1720.
- [36] Rahimpour S, Haglund MM, Friedman AH, et al. History of awake mapping and speech and language localization: from modules to networks[J]. Neurosurg Focus, 2019, 47: E4.
- [37] Tamura Y, Ogawa H, Kapeller C, et al. Passive language mapping combining real-time oscillation analysis with cortico-cortical evoked potentials for awake craniotomy[J]. J Neurosurg, 2016, 125: 1580-1588.
- [38] Fukutomi Y, Yoshimitsu K, Tamura M, et al. Quantitative Evaluation of Efficacy of Intraoperative Examination Monitor for Awake Surgery[J]. World Neurosurg, 2019, 126: 432-438.
- [39] 张鑫, 徐淑军, 马翔宇, 等. 术中唤醒配合神经电生理监测中央沟定位运动区胶质瘤的手术治疗[J]. 中华神经外科杂志, 2014, 30: 900-903.
- [40] Shahar T, Korn A, Barkay G, et al. Elaborate mapping of the posterior visual pathway in awake craniotomy[J]. J Neurosurg, 2017, 128: 1503-1511.
- [41] 王引言, 乔慧, 郭尔安, 等. 开颅唤醒术中空间认知功能的监测与保护技术[J]. 中华神经外科杂志, 2012, 28: 1206-1209.
- [42] Scerrati A, Cavallo MA, De Bonis P. Letter: "Awake intraoperative mapping to identify cortical regions related to music performance: Technical note" [J]. J Clin Neurosci, 2021, 86: 18-19.
- [43] Camporeze B, Galafassi G, Caggiano C, et al. Is awake craniotomy an ideal technique for surgical resection of tumors involving the motor area? Analysis of functional outcomes[J]. J Neurosurg Sci, 2020, 65: 81-84.
- [44] Delion M, Klinger E, Bernard F, et al. Immersing patients in a virtual reality environment for brain mapping during awake surgery: safety study[J]. World Neurosurg, 2020, 134: 937-943.
- [45] André-Obadia N, Zyss J, Gavaret M, et al. Recommendations for the use of electroencephalography and evoked potentials in comatose patients[J]. Neurophysiol Clin, 2018, 48: 143-169.
- [46] Guérit JM, André-Obadia N. A reappraisal of the privileged application of clinical neurophysiology in the intensive care unit[J]. Neurophysiol Clin, 2017, 47: 1-3.
- [47] Acharya S, Hsieh S, Shinohara ET, et al. Effects of race/ethnicity and socioeconomic status on outcome in childhood acute lymphoblastic leukemia[J]. J Pediatr Hematol Oncol, 2016, 38: 350-354.
- [48] Elmer J, Steinberg A. Auditory evoked responses have limited utility after cardiac arrest[J]. Resuscitation, 2020, 154: 115-116.
- [49] Yamamoto T, Watanabe M, Obuchi T, et al. Spinal cord stimulation for vegetative state and minimally conscious state: changes in consciousness level and motor function[J]. Acta Neurochir Suppl, 2017, 124: 37-42.
- [50] Connolly JF, Reilly JP, Fox-Robichaud A, et al. Development of a point of care system for automated coma prognosis: a prospective cohort study protocol[J]. BMJ Open, 2019, 9: e029621.

(本文编辑:王晶)