

·综述 General review·

神经超声在急性缺血性卒中机械性血栓切除术后监测的应用进展

彭 湃, 朱 虹, 刘永晟, 王铭义, 刘勇建, 王 峰

【摘要】 机械性血栓切除术(MT)是目前针对大血管闭塞所致的急性缺血性卒中(AIS)血管再通最有效的手段。但是 MT 术后对患者并发症的监测及管理成为目前棘手的问题,也受到广泛的关注。神经超声技术以无创、灵活及快速诊断等优势在脑血流动力学和结构病理学评估监测领域中已建立完善的体系。随着技术和设备的更新,针对 AIS 患者 MT 术后开启了无创监测颅内压、脑血流自动调节、颅内出血监测及其他占位性病变的导向模式,逐步成为 MT 术后管理的重要工具。本文对 AIS 患者 MT 术后神经超声监测技术的应用发展进行综述,目的是为临床实施前瞻性干预措施提供依据,使 MT 术后管理达到最大获益化,减低 AIS 患者病死率。

【关键词】 神经超声;急性缺血性卒中;机械性血栓切除术;进展

中图分类号:R743.3 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2024)-02-0202-06

Progress in the application of neurosonography in monitoring the patients with acute ischemic stroke after receiving mechanical thrombectomy PENG Pai, ZHU Hong, LIU Yongsheng, WANG Mingyi, LIU Yongjian, WANG Feng. Department of Interventional Therapy, First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian, Liaoning Province 116000, China

Corresponding author: WANG Feng, E-mail: cjr.wangfeng@vip.163.com

【Abstract】 At present, mechanical thrombectomy (MT) is the most effective means of achieving vascular recanalization in treating acute ischemic stroke (AIS) caused by large vessel occlusion. However, the monitoring and management of the patient's complications after MT has become a thorny clinical problem and it has attracted wide attention. Being of its non-invasive, flexible and quick diagnosis, and other advantages, the neurosonography has already established a perfect system in the evaluation and monitoring field of cerebral hemodynamic and structural pathology. With the innovation in technology and equipment, the guiding mode for non-invasive monitoring of intracranial pressure, autoregulation of cerebral blood flow, monitoring of intracranial hemorrhage and detection of other space-occupying lesions has been used for AIS patients, which has gradually become an important tool for the postoperative management of MT. This paper aims to make a comprehensive review about the application of neurosonography monitoring technology in AIS patients after MT, so as to provide a basis for the clinical implementation of prospective interventions, to enable AIS patients to obtain the maximum benefits from the postoperative management of MT, and to reduce the mortality of AIS patients. (J Intervent Radiol, 2024, 32: 202-207)

【Key words】 neurosonography; acute ischemic stroke; mechanical thrombectomy; progress

机械性血栓切除术(mechanical thrombectomy, MT)已是颅内大动脉闭塞所致急性缺血性卒中(acute ischemic stroke, AIS)首推治疗方法^[1-2]。MT 对血管再通率高达 90%, 但 48~72 h 再次发生神经功能恶化发病率为 10%~40%, 如颅内血肿、出血转化、

血管再闭塞、高灌注综合征及颅内高压等没有及时控制, 近期及远期预后较差等^[3]。目前早期神经功能恶化(early neurological deterioration, END)发病机制尚未明确, AIS 患者 MT 术后多在 ICU 病房观察, 神经学评估包括瞳孔反应、运动和感觉功能、颅神经

反射、血流动力学、呼吸功能改变以及影像学检查方法如 CT、功能 MRI。对颅内压的监测多以有创监测法为主,如植入法及插入法。由于多数患者都存在转运、昏迷等一些自身条件的限制,对建立完整的临床神经学评估有一定难度,导致预防及治疗缺乏有效的导向。

神经超声(neurosonology ultrasonic examination, NUE)无创、灵活、快速评估及实时监测的特点已成为 MT 术后脑功能监测的重要工具^[4]。AIS 患者 MT 术后影像学监测与评估以往依赖于脑 CT 及功能 MRI,随着 NUE 的发展,可实现对颅内压、脑血流自动调节功能、脑血流灌注量及颅内血肿监测,是对传统影像学所能获取信息的重要补充。本文对 AIS 患者 MT 术后 NUE 监测技术的应用发展进行综述,目的是为临床实施前瞻性干预措施提供依据。

1 背景和技术

NUE 是对脑血管、脑组织及相关超声技术的广义总称,包括经颅多普勒超声(transcranial Doppler, TCD)、经颅彩色多普勒显像(transcranial color-coded duplex sonography, TCCD)、颈部血管超声(cervical vascular ultrasound, CVUS)、经颅脑实质超声(transcranial brain parenchymasonography, TCS)、周围神经超声及肌肉超声等^[5]。早在 1942 年, Vu 等^[6]对 NUE 技术作出描述,1982 年 NUE 在临床中的应用才逐渐发展^[7]。现今, NUE 在围手术期患者的监测领域得到迅猛的发展,尤其是床旁多模态 NUE 联合技术更是广泛应用^[8-9]。NUE 监测技术已不再是超声医生和脑功能检查科医生的独有技术,越来越多的神经内科、神经外科及介入科医生都可以独立掌握,但是因颅骨的高声学阻抗的限制,合适的声学窗口显像是此技术的难点,因此各领域的医生对此技术的掌握需要规范的培训和长期的训练。

NUE 的核心技术主要为 TCD、TCCD、TCS 及联合 CVUS 完成头颈一体化检查,主要对血流动力学及结构学的监测与评估。NUE 设备需由专业厂商提供,确保探头有显示图像的能力。TCD 探头按频率分为 1.6、2、4、8、16、20 等几种类型,基于多普勒频移技术识别动脉,根据频谱的形态确定血管,目前 TCD 仪器都具备 M 模式,可更为便捷的监测大脑中动脉、大脑前动脉、大脑后动脉及后循环的基底动脉和椎动脉颅内段血流流量。主要的获取参数包括收缩期峰值速度(SV)、舒张速度(DV)、平均速度

(MV)、脉动指数($PI=SV-DV/MV$)和阻力指数($RI=SV-DV/SV$),连续监测 AIS 患者的脑血流速度。此外,还可以无创评估颅内压、脑灌注压、脑血流自动调节等高级参数。TCCD 及 TCS 技术需使用标准的相控探头,在获取脑实质二维灰阶图像基础上联合彩色多普勒模式,获取颅内血管走行分布。TCS 可显示脑的 4 个平面:中脑平面、第三脑室丘脑平面、侧脑室平面和后颅凹小脑平面。通过经眶平面,可以测量到视神经鞘的直径。更先进的技术,如增强和三维 TCS 尚未广泛应用于临床^[10]。NUE 技术是 AIS 患者 MT 术后并发症及预后评估的重要影像学方法,本文对新的应用及其对临床的指导进展进行综述。

2 临床应用现状

2.1 颅内血肿和出血转化的监测

出血转化是 AIS 患者 MT 术后的主要并发症,出血转化发生率为 1.9%~7.0%,较为可靠的监测方法为 MT 术后 19~24 h 复查头 CT 影像^[11]。一些重症的患者因自身条件的限制无法多次转运或已发现颅内血肿时无法多次 CT 监测时,床旁 NUE 监测起着至关重要的作用。TCS 已被应用于监测脑中线位移,颅内血肿范围以及去骨瓣减压后监测脑室系统大小和脑室监测导管位置,并且证实与 CT 有同样的效果^[12]。急性出血或血肿在 TCS 显像中为高回声团块,缺血性栓塞区域为低回声,由于肿瘤和动静脉畸形在显像中也表现为高回声团块,最好的鉴别方法是 CT 与 TCS 联合使用来进行临床的导向。Mäurer 等^[13]对 151 例 MT 术后患者进行出血性和缺血性卒中影像显像敏感性和特异性分析,MT 患者术后 24 h 内均进行了 CT 和 TCS 评估,结果显示 TCS 监测颅内出血的敏感性和特异性分别为 94%和 95%,阳性预测值和阴性预测值分别为 91%和 95%。TCS 可用于床旁快速评估血肿的进展,并已证实与 CT 有良好的相关性^[12],是监测血肿体积或出血范围可靠的工具。

2.2 MT 术后血管再通与闭塞的监测

血管开通后再闭塞与 AIS 患者临床症状恶化相关,早期再闭塞预示远期预后不良。在 MT 术后由于血管内膜损伤导致血小板聚集增多,脂质核心暴露导致血小板激活聚集、原狭窄并未解除导致血流速度减慢,栓子清除能力下降,这些情况下均易发生再闭塞。NUE 应用于大血管闭塞的诊断和评估再通的效果是目前临床中重要的手段^[14]。此外,头颈

一体化评估侧支循环和监测颈动脉和椎动脉的狭窄或闭塞进一步提高诊断率^[15]。AIS 患者脑血流自动调节功能早期受损时,更容易发生脑灌注低或高灌注,这两种情况都可由于脑水肿和颅内压升高而导致脑缺血^[16-17]。NUE 用于评估血管再通的程度和监测潜在的并发症是目前临床公认的 MT 术后评估手段,如监测出血转化和恶性脑水肿的发生,TCD、TCS 与 CT 和 MRI 联合使用是最为准确的方法^[18]。

2.3 MT 术后高灌注综合征的监测

高灌注综合征是指闭塞脑动脉再通后缺血脑组织重新获得血液灌注,同侧脑血流量明显增加,从而导致脑水肿甚至颅内出血发生。再灌注损伤治疗的时间窗尤为重要,当前研究认为^[19]前循环闭塞的血管内治疗时间窗可延长至发病后 8 h,后循环闭塞的血管内治疗时间窗可延长至 24 h 内。TCD、TCCD 的优势是连续监测脑血流速度,以发现突然的变化(即相对低灌注或高灌注、再通或闭塞)^[20-22],也是目前公认 MT 术后脑血流灌注量监测的方法^[23]。最新的研究证实^[24],MT 术后同侧脑血流的速度大于对侧 30% 时就应该注意有高灌注的发生,采取一些临床措施,并且研究与 MRI 对比证实其有一定的相关性。

2.4 无创颅内压监测

颅内压(intracranial pressure, ICP)增高是 AIS 患者 MT 术后常见和潜在的并发症,严重者可危及生命,其发生原因比较复杂,可由各种病理条件引起。NUE 监测 ICP 是一种联合技术,主要运用 TCD、TCS、视神经鞘直径(optic nerve sheath diameter, ONSD)测量及必要时联合 CVUS 技术联合评估,并可早期监测 ICP 升高。目前 NUE 无创监测 ICP 已被众多学者所研究^[25-28],主要包括动脉血流频谱分析、ONSD 测量、脑中线偏移的评估等。

动脉血流频谱分析:ICP 升高会导致外部压力升高对脑血管的压迫,MT 术后的并发症中均会出现早期 ICP 升高的表现。NUE 监测显示收缩期 MCA 速度最早增快,舒张期速度相应下降。当 ICP 严重升高时,舒张期血流可能消失或逆转^[29]。ICP 可以通过计算 PI 来估测,TCD 计算方法为 $ICP=4.47 \times PI+12.68$,TCCD 计算方法为 $ICP=11.1 \times PI-1.43$;两种方法因血流测量角度的偏差使其方法不同,其 PI 增加表明 ICP 增加^[30]与速度测量不同。PI 是一个相对的比率,受到测量角度的影响,正常 $PI < 1.2$,对应的 ICP 约为 12 mmHg, $PI > 2.13$ 与 $ICP > 22$ mmHg 相关^[31]。但是在许多研究中,对 NUE 根据计算 PI 值

在 ICP 评估的可靠性有所异议^[32]。本综述研究中认为,无创 ICP 评估计算是有创 ICP 替代技术,主要以半定量分析结果,无法取代有创检查的准确性。目前对无创 ICP 评估的研究中,不同的学者持有不同的观点,但是仅针对于半定量评估中,NUE 无创监测 ICP 是目前最为实用准确的手段。

ONSD 测量:视神经是中枢神经系统的一部分,包绕在视神经周围的视神经内蛛网膜下腔与颅内部分压力的变化一致,是对 ICP 监测重要的半定量评估的重要指标。在测量前,视神经尽可能位于整个画面的中心,ONSD 需要在眼球下 3 mm 进行测量,每侧眼球两个平面各测 2 次,取其平均值。ICP 的变化较直接地反应在 ONSD 上,是对 ICP 早期监测的重要替代方法^[33]。有研究表明,超声 ONSD 测量与放射评分系统(CT、MRI)测量和有创方法测量 ICP 有直接的相关性^[34-35]。超声 ONSD 测量评估 ICP 也被证实有一定的可靠性和重复性,是临床中较为普及的方法^[36-37],与其他无创 ICP 评估技术相比,ONSD 具有很强的预测能力^[38-39]。

脑中线偏移的评估:脑中线偏移是一种危及生命的疾病征象。MT 术后若检测到脑中线偏移则需要紧急神经外科干预,以防止继发性神经损伤。CT 测量脑中线超过 0.5 cm 时,是颅脑术后不良的因素^[40]。NUE 中 TCS 技术是最直接简便的观察颅内结构的一种技术,虽然与放射技术相比对颅内结构的观察有一定的缺陷,但是对监测脑中线的偏移变化是较快速准确的方法。应用超声技术观察颅内结构最早应用于 ICU,研究发现,与金标准相比,超声评估中线移位与 CT 评估呈正相关性^[41]。因此,NUE 技术可对急性颅脑损伤患者及 MT 术后患者进行床旁监测。但有学者提出质疑意见^[42-43],认为超声对脑中线位移的评估误差较大,并不准确。本综述认为 TCS 技术对颅内结构的显像监测是对放射影像学技术的一个重要补充,技术的重要特点在于快捷性及早期发现病变变化,是一种对 ICP 和脑疝发生的早期可靠的监测工具。

2.5 脑血流自动调节功能

脑血流自动调节(cerebral autoregulation, CA)功能是指大脑在不同的脑灌注压时维持恒定血流的能力,是大脑在一种内在保护机制。CA 功能指标是对 AIS 患者 MT 术后预后结局的重要指标。目前,CA 的生理机制还没有完全被解释,但普遍认为 CA 受肌源性、神经源性、内皮性和代谢性这 4 种机制相互作用调控。目前大量研究表明,AIS 患者 CA 功

能均有不同程度的损伤。然而,关于患者是在发病前即存在较差的 CA,还是由于缺血性卒中引起 CA 受损,目前仍存在较大争议。研究表明,CA 随着 AIS 病程的变化而变化。

CA 的常用评估指标包括以下几种^[44]。脑自动调节指数(ARI):该指标假设脑血流速度被动随血压下降,将 CA 的状态从完好到消失划分成 10 级(0~9),ARI 的值越大代表 CA 能力越来越强,若 $ARI < 4$,则认为 CA 受损。脑血流恢复速率(RoR):该指标通过分析血压下降刺激脑血流速度的恢复时间,评估 CA 的有效性。平均速度指数(Mx):该参数主要研究脑血流速度与动脉血压变化的相关性。若 Mx 为 0 或负值,提示脑血流速度和脑灌注之间无关或负相关,即血压与脑血流速度之间存在时间差,并非完全同步变化,代表 CA 功能正常;若为正值,提示脑血流速度和脑灌注之间正相关,即完全同步变化,代表 CA 功能受损。传递函数分析(TFA)的相关参数:传递函数分析采用快速傅里叶变换计算,从增益(Gain)、相位(Phase)和相干性(Coherence)3 个方面量化了 CA。增益值较低代表脑血流速度受动脉压波动影响较小,CA 功能较好,增益值较高代表脑血流速度受动脉压影响较大,CA 功能较差。相移表示了特定频率下动脉压和脑血流速度之间的时滞。因此,动脉压波动与脑血流速度波动间的相移越大,代表 CA 调节能力越好,数值趋近于 0,代表 CA 调节能力几乎消失。相干性反应了动脉压和脑血流速度之间的相关性,取值范围在 0 到 1 之间,如果这两个信号是纯线性相关的,没有任何额外的噪声贡献,那么相干性是 1,代表 CA 功能受损;趋近于 0 代表两者无相关性,但较低的相关性也可能是由于信号干扰较大引起,造成数据失真。在现实生活中由于噪声的存在,相干度的大多数值都小于 1。因此,多数研究中高于 0.5 的数据被认为是有效的。小波分析技术的相关参数:小波相干性、小波相位相干性是两种常用的基于小波分析的 CA 功能评估指标。小波相干性来表示两个不同时间序列相关程度,取值在 0 到 1 中间,当该值为 1 时说明动脉压和脑血流之间有明显的线性关系,代表 CA 功能受损,为 0 时说明缺乏明显的关系,CA 功能较好。

1996 年 Czosnyka 等^[45]首次研究了使用 TCD 持续评估 AIS 患者 CA 功能,此技术发展至今,多项研究表明使用 TCD 在不同类型的急性脑损伤^[46]患者中评估 CA 功能和脑血管反应性的效用。但需要注意的是,在自动调节评估中流速被用来作为脑血流

的替代物,有很多因素可以在不相应改变脑血流的情况下改变流速。同样,在大多数研究中自动调节评估通常只在前循环中进行。CA 能力的定量评估是近 20 年 CA 研究的热点和难点。迄今尚缺乏检测“金标准”,研究思路多采用数学建模方法,通过分析血压与脑血流量之间的函数关系,定量评估 CA 能力,主要分为线性函数模型和非线性函数模型。CA 功能的评估被用于 MT 术后是精准医学和现代医学发展的必然趋势,对于诸多临床实际问题都有重要意义,如脑卒中急性期管理中的血压管理和颅内高压治疗、二级预防中的大动脉粥样硬化性患者制定个体化降压目标等,相信随着 CA 研究的深入,这一研究领域还将获得更大的突破^[47]。

2.6 脑循环停止的判断

脑循环停止是 MT 术后最严重的结果,根据神经学标准确定死亡是一种临床诊断,目前需要对脑干功能进行具体的评估。然而,在某些情况下需要辅助检查来证明脑血流的缺失,特别是当临床检查与其他因素(如体温过低、代谢紊乱、鼓膜穿孔等)混淆时。当双侧血管满足 3 个标准之一时,TCD 可确认脑循环停止,至少 2 次测量 30 min:振荡波形,收缩期和舒张期流量几乎相等;小的收缩期峰值 $< 50 \text{ cm/s}$,持续时间 $< 200 \text{ ms}$;所有先前看到的颅内血流和颅外血流消失仍存在^[48]。最近的一项 Meta 分析显示,TCD 对根据神经学标准确定死亡具有很高的准确性^[49],敏感性和特异性分别为 90%和 98%。

3 结论

NUE 对 AIS 患者 MT 术后的监测是一种对脑血管、脑结构及相关脏器联合评估技术,也是监测 MT 术后脑血流动力学和脑结构的一种以功能性监测为重点的技术手段,以其有效、无创、安全、方便的优势用于快速评估。随着技术及设备的进步,神经超声的临床运用将更为广泛,甚至临床会对其形成依赖性。总的来说,NUE 已被证实是无创技术对有创检查的一种重要的替代手段,其结果具有相关可比性。

[参考文献]

- [1] Liu H, He Y, Zhou T, et al. Evaluation of using a double helical, closed-cell stent-retriever(Skyflow) for thrombectomy procedures in acute arterial occlusion: a preclinical study and a clinical trial[J]. J Interv Med, 2022, 5: 190-195.
- [2] Ohta T, Tanaka K, Koge J, et al. Stent retriever or aspiration catheter

- alone vs their combination as the first-line thrombectomy in acute stroke[J]. *Neurosurgery*, 2023, 92: 159-166.
- [3] 吕晓颖,王承汉,王正则,等. 急性缺血性脑卒中取栓术后出血转化相关因素研究进展[J]. *介入放射学杂志*, 2022, 31:310-314.
 - [4] 吉林省医学会神经病学分会,吉林省卒中学会,杨 弋,等. 动态脑血流自动调节功能评估在神经系统疾病中的临床应用专家共识(2021)[J]. *中华脑血管病杂志(电子版)*, 2021, 15: 140-152.
 - [5] 中国医师协会神经内科医师分会神经超声专业委员会,中华医学会神经病学分会神经影像协作组. 中国神经超声的操作规范[J]. *中华医学杂志*, 2017, 97:3043-3050.
 - [6] Vu EL, Brady K, Hogue CW. High-resolution perioperative cerebral blood flow autoregulation measurement: a practical and feasible approach for widespread clinical monitoring[J]. *Br J Anaesth*, 2022, 128:405-408.
 - [7] Aaslid R, Markwalder TM, Nornes H. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries[J]. *J Neurosurg*, 1982, 57: 769-774.
 - [8] Robba C, Goffi A, Geeraerts T, et al. Brain ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications. A narrative review[J]. *Intensive Care Med*, 2019, 45: 913-927.
 - [9] Bertuetti R, Gritti P, Pelosi P, et al. How to use cerebral ultrasound in the ICU[J]. *Minerva Anestesiol*, 2020, 86: 327-340.
 - [10] Li Q, Hua Y, Liu J, et al. Intraoperative transcranial Doppler monitoring predicts the risk of cerebral hyperperfusion syndrome after carotid endarterectomy[J]. *World Neurosurg*, 2022, 165: e571-e580.
 - [11] 刘钦晨,贾振宇,赵林波,等. 梗死核心容积预测急性前循环大血管闭塞患者机械取栓术后出血转化的价值[J]. *介入放射学杂志*, 2021, 30:756-760.
 - [12] Blanco P, Blaivas M. Applications of transcranial color-coded sonography in the emergency department[J]. *J Ultrasound Med*, 2017, 36: 1251-1266.
 - [13] Mäurer M, Shambal S, Berg D, et al. Differentiation between intracerebral hemorrhage and ischemic stroke by transcranial color-coded duplex-sonography[J]. *Stroke*, 1998, 29: 2563-2567.
 - [14] Schlachetzki F, Herzberg M, Hölscher T, et al. Transcranial ultrasound from diagnosis to early stroke treatment: part 2: prehospital neurosonography in patients with acute stroke: the Regensburg stroke mobile project[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2012, 33: 262-271.
 - [15] Chernyshev OY, Garami Z, Calleja S, et al. Yield and accuracy of urgent combined carotid/transcranial ultrasound testing in acute cerebral ischemia[J]. *Stroke*, 2005, 36: 32-37.
 - [16] Ragoschke-Schumm A, Walter S. DAWN and DEFUSE-3 trials: is time still important?[J]. *Radiologe*, 2018, 58: 20-23.
 - [17] Castro P, Azevedo E, Sorond F. Cerebral autoregulation in stroke[J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2018, 20: 37.
 - [18] Itoh T, Matsumoto M, Handa N, et al. Rate of successful recording of blood flow signals in the middle cerebral artery using transcranial Doppler sonography[J]. *Stroke*, 1993, 24: 1192-1195.
 - [19] Kondziella D, Cortsen M, Eskesen V, et al. Update on acute endovascular and surgical stroke treatment[J]. *Acta Neurol Scand*, 2013, 127:1-9.
 - [20] Spencer MP. Transcranial Doppler monitoring and causes of stroke from carotid endarterectomy[J]. *Stroke*, 1997, 28: 685-691.
 - [21] Ackerstaff RG, Moons KG, van de Vlasakker CJ, et al. Association of intraoperative transcranial Doppler monitoring variables with stroke from carotid endarterectomy[J]. *Stroke*, 2000, 31: 1817-1823.
 - [22] Toyama S, Sakai H, Ito S, et al. Cerebral hypoperfusion during pediatric cardiac surgery detected by combined bispectral index monitoring and transcranial Doppler ultrasonography[J]. *J Clin Anesth*, 2011, 23: 498-501.
 - [23] Razumovsky AY, Jahangiri FR, Balzer J, et al. ASNM and ASN joint guidelines for transcranial Doppler ultrasonic monitoring: an update[J]. *J Neuroimaging*, 2022, 32: 781-797.
 - [24] Prosperi-Porta G, Ronsley P, Kiamanesh O, et al. Prognostic value of echocardiography-derived right ventricular dysfunction in haemodynamically stable pulmonary embolism: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Respir Rev*, 2022, 31: 220120.
 - [25] Robba C, Bacigaluppi S, Cardim D, et al. Non-invasive assessment of intracranial pressure[J]. *Acta Neurol Scand*, 2016, 134: 4-21.
 - [26] Fargen KM, Kittel C, Curry BP, et al. Mechanical thrombectomy decision making and prognostication: Stroke treatment Assessments prior to Thrombectomy In Neurointervention (SATIN) study[J]. *J Neurointerv Surg*, 2023, 15:e381-e387.
 - [27] Dinsmore M, Venkatraghavan L. Clinical applications of point-of-care ultrasound in brain injury: a narrative review[J]. *Anaesthesia*, 2022, 77(Suppl 1):69-77.
 - [28] Cardim D, Griesdale DE, Ainslie PN, et al. A comparison of non-invasive versus invasive measures of intracranial pressure in hypoxic ischaemic brain injury after cardiac arrest[J]. *Resuscitation*, 2019, 137: 221-228.
 - [29] Lau VI, Jaidka A, Wiskar K, et al. Better with ultrasound: transcranial Doppler[J]. *Chest*, 2020, 157: 142-150.
 - [30] Gosling RG, King DH. Arterial assessment by Doppler-shift ultrasound[J]. *Proc R Soc Med*, 1974, 67: 447-449.
 - [31] Bellner J, Romner B, Reinstrup P, et al. Transcranial Doppler sonography pulsatility index (PI) reflects intracranial pressure (ICP)[J]. *Surg Neurol*, 2004, 62: 45-51.
 - [32] Zweifel C, Czosnyka M, Carrera E, et al. Reliability of the blood flow velocity pulsatility index for assessment of intracranial and cerebral perfusion pressures in head-injured patients[J]. *Neurosurgery*, 2012, 71: 853-61.
 - [33] Dubourg J, Javouhey E, Geeraerts T, et al. Ultrasonography of optic nerve sheath diameter for detection of raised intracranial pressure: a systematic review and meta-analysis[J]. *Intensive Care Med*, 2011, 37: 1059-1068.
 - [34] Das SK, Shetty SP, Sen KK. A novel triage tool: optic nerve sheath diameter in traumatic brain injury and its correlation to Rotterdam computed tomography (CT) scoring[J]. *Pol J Radiol*, 2017, 82: 240-243.
 - [35] Geeraerts T, Newcombe VF, Coles JP, et al. Use of T2-weighted

- magnetic resonance imaging of the optic nerve sheath to detect raised intracranial pressure[J]. Crit Care, 2008, 12: R114.
- [36] Bauerle J, Lochner P, Kaps M, et al. Intra- and interobserver reliability of sonographic assessment of the optic nerve sheath diameter in healthy adults[J]. J Neuroimaging, 2012, 22: 42-45.
- [37] Dinsmore M, Han JS, Fisher JA, et al. Effects of acute controlled changes in end-tidal carbon dioxide on the diameter of the optic nerve sheath; a transorbital ultrasonographic study in healthy volunteers[J]. Anaesthesia, 2017, 72: 618-623.
- [38] Robba C, Cardim D, Tajsic T, et al. Ultrasound non-invasive measurement of intracranial pressure in neurointensive care: a prospective observational study[J]. PLoS Med, 2017, 14: e1002356.
- [39] Cardim D, Robba C, Donnelly J, et al. Prospective study on noninvasive assessment of intracranial pressure in traumatic brain-injured patients: comparison of four methods[J]. J Neurotrauma, 2016, 33: 792-802.
- [40] Seidel G, Gerriets T, Kaps M, et al. Dislocation of the third ventricle due space-occupying stroke evaluated by transcranial duplex sonography[J]. J Neuroimaging, 1996, 6: 227-230.
- [41] Motuel J, Biette I, Srairi M, et al. Assessment of brain midline shift using sonography in neurosurgical ICU patients[J]. Crit Care, 2014, 18: 676.
- [42] Llompart Pou JA, Abadal Centellas JM, Palmer Sans M, et al. Monitoring midline shift by transcranial color-coded sonography in traumatic brain injury. A comparison with cranial computerized tomography[J]. Intensive Care Med, 2004, 30: 1672-1675.
- [43] Caricato A, Pitoni S, Montini L, et al. Echography in brain imaging in intensive care unit: state of the art[J]. World J Radiol, 2014, 6: 636-642.
- [44] Ogoh S, Sugawara J, Shibata S. Does cardiac function affect cerebral blood flow regulation?[J]. J Clin Med, 2022, 11: 6043.
- [45] Czosnyka M, Smielewski P, Kirkpatrick P, et al. Monitoring of cerebral autoregulation in head-injured patients[J]. Stroke, 1996, 27: 1829-1834.
- [46] Robba C, Cardim D, Sekhon M, et al. Transcranial Doppler: a stethoscope for the brain-neurocritical care use[J]. J Neurosci Res, 2018, 96: 720-730.
- [47] 李凡, 邢海英, 金海强, 等. 脑血流自动调节研究发展史[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2021, 21: 9-13.
- [48] Naqvi J, Yap KH, Ahmad G, et al. Transcranial doppler ultrasound: a review of the physical principles and major applications in critical care[J]. Int J Vasc Med, 2013, 2013: 629378.
- [49] Chang JJ, Tsivgoulis G, Katsanos AH, et al. Diagnostic accuracy of transcranial Doppler for brain death confirmation: systematic review and meta-analysis[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2016, 37: 408-414.

(收稿日期: 2022-12-07)

(本文编辑: 茹实)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告