

## 颅内压监测在颅脑损伤中的应用进展

顾帅鹏<sup>1</sup> 龚嵩<sup>2</sup> 高伟<sup>1Δ</sup>

**[摘要]** 颅脑损伤患者往往伴随着不同程度的颅内压(intracranial pressure, ICP)增高, ICP 增高又是造成各种临床症状和不良预后的重要病理生理因素。临床上对创伤性颅脑损伤患者进行及时且有效的 ICP 监测能更及时准确地为临床治疗提供依据, 利于患者预后。面对不同程度的颅脑损伤患者, 选择合适的 ICP 监测工具有利于病情监测, 减少患者痛苦。本文针对目前有创和无创 ICP 监测方式在颅脑损伤患者中的应用进展进行了全面的回顾和阐述, 探讨临床无创监测 ICP 手段的发展方向和应用前景。

**[关键词]** 颅内压监测; 创伤性颅脑损伤; 无创颅内压监测; 颅内高压; 应用

**DOI:**10.13201/j.issn.1009-5918.2024.02.007

**[中图分类号]** R726.5 **[文献标志码]** A

### Application progress of intracranial pressure monitoring in craniocerebral injury

GU Shuai-peng<sup>1</sup> GONG Song<sup>2</sup> GAO Wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Trauma Surgery, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430030, China; <sup>2</sup>Department of Emergency Surgery, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology)  
Corresponding author: GAO Wei, E-mail: gaobull@126.com

**Abstract** Patients with traumatic brain injury often experience different degrees of increased intracranial pressure(ICP), which is a significant physiopathologic factor associated with various clinical symptoms and poor outcomes. Timely and effective ICP monitoring in patients with traumatic brain injury plays a crucial role in providing accurate information for clinical decision-making and improving the prognosis of patients. Selecting appropriate ICP monitoring tools for patients with different degrees of brain injury is beneficial for monitoring the condition and reducing the patients' discomfort. This paper provides a comprehensive review and discussion of the current progress in the application of invasive and non-invasive ICP monitoring methods in patients with traumatic brain injury, aiming to explore the development direction and application prospects of non-invasive ICP monitoring in the future.

**Key words** intracranial pressure monitoring; traumatic brain injury; noninvasive intracranial pressure monitoring; intracranial hypertension; application

创伤患者头部的损伤特别是中重度的创伤性颅脑损伤(traumatic brain injury, TBI)常常是导致患者致残甚至致死的重要因素之一<sup>[1]</sup>。颅脑损伤后的主要病理生理表现是颅内压(intracranial pressure, ICP)增高。ICP 升高会导致机体自我调节功能失调, 随之带来如脑灌注压降低、静脉窦回流受阻、继发脑疝、脑干损伤等脑部不可逆性损伤, 甚至可导致患者死亡<sup>[2]</sup>。相关研究已经证实 ICP

升高是颅脑损伤患者死亡的独立危险因素<sup>[3]</sup>, 所以对颅脑损伤患者要进行严格的 ICP 管理。合适的 ICP 监测手段是辅助诊断颅内高压最迅速和准确的方法, 也是观察患者病情变化、确定手术时机、指导临床药物治疗、判断和改善预后的重要手段。目前美国《重型颅脑创伤诊疗指南(第四版)》<sup>[4]</sup>对于 ICP 监测实行 II B 级推荐即推荐使用 ICP 监测的信息救治重型颅脑损伤患者, 这可以降低院内及伤后 2 周的病死率。对于颅脑损伤特别是重症颅脑损伤患者, ICP 是评估其病情变化的关键临床监测指标。

#### 1 颅内压监测的类型

自 Lundberg 等在 1960 年开始将有创 ICP 测

<sup>1</sup>华中科技大学同济医学院附属同济医院创伤外科(武汉, 430030)

<sup>2</sup>华中科技大学同济医学院附属同济医院急诊外科

<sup>Δ</sup>审校者

通信作者: 高伟, E-mail: gaobull@126.com

量应用于临床使用以来,人们对 ICP 升高危害的认识逐渐加深,ICP 监测也成为神经内外科常规的重要监测手段。随着临床研究的进展,更多安全的无创 ICP 监测手段<sup>[5-6]</sup>也逐渐出现。目前 ICP 监测装置根据其是否需要创操作可分为有创 ICP 监测和无创 ICP 监测。有创 ICP 监测方法至今仍是 ICP 监测公认最为精确的金标准,无创 ICP 监测则还处于持续的研究和发展中<sup>[7]</sup>。

## 2 有创颅内压监测装置

有创 ICP 监测发展至今,脑室外引流(external ventricular drainage,EVD)置管测压仍是测量 ICP 的金标准,也是最准确、较低成本和可靠的 ICP 监测方法。伴随着各种压力传感器在有创 ICP 监测中的使用,有创 ICP 监测分为以 EVD 装置为代表的流体耦合系统和以各种微型传感器为代表的非流体耦合系统。相较于非流体耦合系统,EVD 装置除了可监测 ICP 外,还有促进脑脊液治疗性引流、鞘内给药(抗生素、溶栓药物)和脑室内出血引流等治疗作用<sup>[8]</sup>。但是 EVD 装置在行治疗性脑脊液引流时,特别是合并颅内占位性病变的情况下,有诱发脑疝的可能。此外 EVD 装置也更容易因为堵塞及体位改变而导致 ICP 测量产生误差<sup>[9]</sup>。有创 ICP 测量装置主要风险是置入颅内操作中的出血及术后感染。尽管通过改进置管操作流程及使用抗生素浸泡等方式大大降低了 EVD 感染的发生率<sup>[10]</sup>,但感染仍是其面临的巨大挑战。

有创 ICP 监测需要特定的颅内空间和穿刺置入,且容易伴有并发症,但对许多患者来说仍具有不可替代的价值。特别是对于重型颅脑损伤患者,动态 ICP 监测是决定或调整治疗方案的关键监测指标。由于目前无创 ICP 监测装置进行持续监测还难以达到理想的准确性,有创 ICP 监测仍是重型颅脑损伤患者开颅术后进行监测 ICP 的首选方法。

## 3 无创颅内压监测装置

无创 ICP 监测正处在发展及研究的动态进程中,尚未有统一公认标准建立<sup>[7]</sup>。无创 ICP 监测方法多样,根据其入路及设备类型可分为经眼部结构测压、经耳部结构测压、基于超声技术的无创测压及其他新技术等方法。

### 3.1 经眼部结构监测颅内压

ICP 升高会增加视神经鞘周围蛛网膜下腔脑脊液的压力,从而阻碍通过视网膜和视神经盘回流的视网膜中央静脉循环。这会带来视神经盘水肿、视野缺损、视神经鞘直径增加和眼压(intraocular pressure,IOP)升高等症状<sup>[11]</sup>。从解剖和病理生理角度来看,通过眼部结构来判断 ICP 是否升高是可行的。经眼部监测 ICP 的方式多种多样,目前相关研究的主流方法有视神经鞘直径测量法、闪光视觉

诱发电位测量法、瞳孔测量法、光学相干断层摄影法、经视网膜血管等。

**3.1.1 视神经鞘直径测量法** 视神经鞘直径(optic nerve sheath diameter,ONSD)由硬脑膜、蛛网膜、软脑膜三层脑膜结构延伸而成,其中环绕视神经的蛛网膜下腔包含着脑脊液,并且与颅内脑脊液直接相通。ICP 升高时颅内的脑脊液会经过视神经管,进入视神经蛛网膜下腔,使 ONSD 升高<sup>[12]</sup>,这是 ONSD 能反映颅内高压的重要理论依据。在目前所有的非侵入性 ICP 监测中,ONSD 也是研究最多、最完善的一种方法,多项研究证实 ONSD 与 ICP 之间存在线性关系<sup>[13]</sup>。最新的一篇 ONSD 前瞻性诊断试验研究的 meta 分析<sup>[14]</sup>纳入了 71 个研究共 4 551 例患者,分析得出超声测量 ONSD 扩张诊断 ICP 增高的最佳截断值为 5.0 mm。该研究也发现 ONSD 测量识别外伤性脑损伤组患者 ICP 增高的灵敏度和特异度分别高达 97% 和 86%,显著高于非创伤组,可见 ONSD 测量法在颅脑损伤患者中有更好的适用性。当然对于不同年龄阶段的人群 ONSD 截断值也不同,在一份回顾研究中小儿头部外伤 ONSD 的标准阈值为:1~15 岁的小儿 4.5 mm,1 岁以下的小儿 4.0 mm<sup>[15]</sup>。在 ONSD 测量工具的选择上,已有研究证实超声与 CT、MRI 检查结果无显著差异<sup>[16]</sup>,而且超声测量 ONSD 来监测 ICP,其操作简单,易重复,在重度颅脑损伤患者的院前急救和重症监护中具有很好的应用前景。

尽管 ONSD 测量法在颅脑损伤有较好的适用性<sup>[17]</sup>,但其也有难以避免的缺陷。近年来的研究发现,腰椎穿刺等侵入性操作与手术<sup>[18]</sup>和黏多糖(贮积)病及其他相关基础疾病<sup>[19]</sup>等多种因素均可对 ONSD 产生影响,从而干扰 ICP 的评估。此外,因为 ONSD 数值在不同年龄阶段、种族中有较大变异,目前尚无 ONSD 测量法的共识诊断标准。鉴于此,国内外开展了相关研究的改良方案,如利用视神经鞘直径与眼球横径比值在人群中的变异比单纯测量 ONSD 要小得多<sup>[20]</sup>的特性,将其应用到 ICP 监测,可以获得更高的相关性,更容易获得截断值。如果这种方法是可行的,将有望促进非侵入性 ICP 监测方法共同标准的建立。

**3.1.2 闪光视觉诱发电位** 闪光视觉诱发电位(flash visual evoked potential,FVEP)是指视网膜受到均匀闪光刺激后枕叶皮层发生的电位变化,它可以反映从视网膜到枕叶皮层的视觉通路的完整性。ICP 升高引起的脑干和血管的机械压迫可损害脑血液循环,导致神经元和神经纤维缺血缺氧,脑组织代谢受损,神经元电信号传导受阻。这使得 FVEP 产生波峰潜伏期延长,波幅减小,波宽增大

等改变,如果合并有脑疝,这种现象会更加明显。基于 FVEP 特定波的变化与 ICP 的关联性,可以合理推测 ICP 的状况<sup>[21]</sup>。目前,基于 FVEP 原理的无创 ICP 监测仪在我国已经商用,并在脑外伤、高血压脑出血等重症监护病房有一定临床应用价值<sup>[22]</sup>。但 FEVP 临床运用中也有一定局限性,其在多发性硬化、视神经肿瘤和异常等人群方面<sup>[23]</sup>的适用性差,且在正常人群中存在较高的异质性。

**3.1.3 瞳孔测量法** ICP 增加可导致动眼及副交感神经通路受到机械压迫,进而抑制瞳孔反应,导致瞳孔直径增加和对光反射反应性降低,在怀疑有 ICP 增高的颅脑损伤患者中瞳孔直径和其对光反射的变化能在一定程度上反映 ICP 水平<sup>[24]</sup>。自动瞳孔测量仪器能识别微小的瞳孔收缩或持续的改变,并连续记录瞳孔变化情况,还可以将与瞳孔反射有关参数进行算法变换,计算得出神经学瞳孔指数(NPi)<sup>[25]</sup>,从而对患者瞳孔的反应性进行量化。在瞳孔测量与 ICP 的相关研究中,Mcnett 等<sup>[26]</sup>通过前瞻性队列研究发现瞳孔计值和 ICP 显著相关。然而也有研究发现 NPi 与 ICP 相关性较弱,且其差异无统计学意义<sup>[27]</sup>。瞳孔对光的反应性会受到相关神经功能障碍、各种药物、个人的情绪状态等多种因素的影响,瞳孔测量法连续预测 ICP 并不可靠。自动瞳孔测量仪在颅脑损伤患者中的应用极大地提高了瞳孔记录的科学性和连续性,避免了人工记录的主观性,为患者的持续病情变化提供了更多信息。自动瞳孔测量仪使用简便,值得在重症颅脑外伤患者中推广应用。

**3.1.4 光学相干断层扫描技术** ICP 增高时的重要临床表现之一就是视盘水肿,光学相干断层扫描(optical coherence tomography,OCT)可测量视盘水肿中的视网膜神经纤维层厚度,所以 OCT 技术可间接评估 ICP。目前 OCT 在特发性颅内高压患者中可用于辅助诊断 ICP<sup>[28]</sup>。但在颅脑损伤患者中,OCT 会因视盘水肿过于严重难以测量和视盘水肿的发生速度不及时,反映 ICP 变化的准确性和时效性不佳<sup>[29]</sup>。

**3.1.5 经视网膜血管** ICP 升高时,视神经鞘内蛛网膜下腔脑脊液(cerebro spinal fluid,CSF)压力也会升高,其和肿胀的视盘一起会对临近的视网膜中央静脉施加外部压力,增加其血管阻力,因此视网膜中央静脉的血流动力学参数理论上可反映 ICP 变化<sup>[30]</sup>。视网膜静脉搏动是视网膜静脉压和眼压及脑脊液共同作用的结果,使用特殊设备测量视网膜静脉搏动可用来反应 ICP 变化<sup>[31]</sup>进行 ICP 监测,但该方法准确性并不高<sup>[32]</sup>。Andersen 等<sup>[33]</sup>通过眼底成像计算视网膜小动脉和小静脉直径比值与 ICP 测量结果比较,发现 ICP 与视网膜动静脉

直径比值在  $ICP \geq 15 \text{ mmHg}$  ( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ ) 时存在显著相关性。这个发现也为无创 ICP 监测提供了一种新的思路。但经视网膜血管监测 ICP 仍处于初步探索阶段,其易受眼部基础疾病、个体差异干扰,而且难以持续测量。

### 3.2 经耳部结构监测 ICP

**3.2.1 鼓膜位移技术** ICP 的变化可以通过耳蜗导水管传递到耳蜗的外淋巴。耳蜗外淋巴周围压力的变化进而导致内耳听骨运动,从而引起鼓膜移位,测量位移可间接反映 ICP<sup>[34]</sup>。Shimbles 等<sup>[35]</sup>在 135 例脑积水患者、13 例良性颅内高压患者和 77 例健康志愿者中对鼓膜位移(tympanic membrane displacement,TMD)技术进行技术评价,发现 TMD 技术与 ICP 之间存在显著相关性,但受试者之间的变异性较高,不适于 ICP 的可靠测量,需要一个特定基线校准。TMD 技术测量依赖于正常的耳道结构,且易受心脏搏动影响。为了减少 TMD 技术的变异性,有研究提出使用脉冲相减技术来提高诱发 TMD 测量的可重复性<sup>[36]</sup>,进而提高 TMD 在不同人群中无创 ICP 测量的可靠性。目前涉及颅脑损伤的 TMD 技术研究较少,还要更多的临床应用研究。

**3.2.2 耳部经颅声学信号** 耳部经颅声学信号原理是通过在一侧耳发出声学信号,另一侧耳接收并进行信号分析,通过声学信号模拟来反映 ICP,相关仿真实验研究<sup>[37]</sup>中其最大误差不超过 5%。Ganslandt 等<sup>[38]</sup>使用基于耳部经颅声学信号原理设计的 HS-1000 型无创监测仪在 14 例颅脑损伤患者中进行无创 ICP 监测和有创监测对比研究。其中 63% 的无创监测 ICP 与有创监测 ICP 数据配对相差在  $\pm 3 \text{ mmHg}$ ,85% 的数据配对相差在  $\pm 5 \text{ mmHg}$ ,两者皮尔逊相关系数为 0.82,该无创监测仪具备准确监测 ICP 的能力。其局限在于易受耳道内出血或脑脊液漏及患者自身声音影响测量结果,不适用于伴有颅底骨折和咳嗽谵妄的患者。HS-1000 型无创监测仪可以满足在颅脑损伤患者进行无创监测 ICP 变化的需求,但目前研究纳入病例较少,还需要进一步验证。

**3.2.3 耳声发射技术** 耳声发射(otoacoustic emission,OAE)技术是指使用特定技术设备监测收集耳蜗在受到外源性声刺激后重新发出的声音。已有研究证实 OAE 可以对 ICP 的变化有较好的反应相关性<sup>[39]</sup>,可以用来无创监测 ICP 的变化。然而 OAE 并不能绝对测量 ICP 数值,只能在确定了 ICP 基线水平上的患者中用来评估 ICP 的变化<sup>[39]</sup>。OAE 技术的局限性是个体间存在显著差异,且只能用在听力正常的人身上<sup>[40]</sup>。OAE 技术尚不适用于重症颅脑损伤患者无创 ICP 的连续测

量,但可用来定期评估 ICP 变化,在辅助诊断颅内低压上也有一定价值<sup>[41]</sup>。

### 3.3 超声技术测 ICP

超声是创伤快速评估的首选方法,在创伤患者的评估中发挥着重要作用。超声技术除了前文所述通过测量 ONSD 评估 ICP 外,还有经颅多普勒和双深度经眼眶多普勒评估 ICP 方法。

**3.3.1 经颅多普勒** ICP 可对脑血流速度和波形产生特定的改变,血流频谱会出现舒张末期流速(Vd)降低,脉动指数(pulsatility index,PI)增加等变化。经颅多普勒(transcranial doppler,TCD)可通过监测颅内血管(如大脑中动脉)的血流动力学及血流生理参数变化,然后利用计算机数学算法进行分析模拟信号来评估 ICP<sup>[42]</sup>。TCD 预测 ICP 的算法也在不断地被改进、验证。Park 等<sup>[43]</sup>提出了一种新的基于无迹卡尔曼滤波器用于实时和无创 ICP 监测的算法并且证明了该算法计算出的 ICP 与有创 ICP 之间存在较好相关性,但该研究病例数过少,仍需要更多的病例数的验证改进算法。在另一项前瞻性研究中,Robba 等<sup>[44]</sup>发现直窦静脉经颅多普勒的收缩流速(FV<sub>sv</sub>)与 ICP 显示出良好的相关性( $r=0.72$ ),使用 ONSD 和 FV<sub>sv</sub> 的组合更是能大大提高 ICP 的预测准确度。目前对于 TCD 监测 ICP 的研究也有很多不同意见,在 Cardim 等<sup>[45]</sup>的一项前瞻性研究中,通过比较 100 例患者同时进行 ICP 的 TCD 监测与有创 ICP 监测发现两者相关性很低,仅用 TCD 并不能用来评估 ICP。总的来看,TCD 对于 ICP 的无创评估目前仍是不够准确和成熟的方法,其检查结果易受到操作者的技术水平及脑血管痉挛等因素的影响。

**3.3.2 双深度经眼眶多普勒超声技术** 双深度经眼眶多普勒超声(two-depth transorbital Doppler,TDTD)技术原理是利用眼动脉(ophthalmic artery,OA)充当天然的 ICP 传感器,通过识别颈内动脉的边缘,并以此深度作为参考点,可以选择 OA 的颅内段和颅外段<sup>[46]</sup>测量流速。因为眼动脉的颅内段承受的压力来自 ICP,故可使用特定超声测量装置对眼部外界施加压力(Pe)压迫 OA 的颅外段,当颅内颅外两段血管的血流参数相同时,则说明两段受到的压力刺激相同,即  $ICP=Pe$ ,这样就实现了无创测量 ICP。Killer 等<sup>[47]</sup>在颅脑损伤患者中进行了 TDTD 技术和 EVD 技术的对比研究中发现 TDTD 无创测量的计算准确度为 0.10 mmHg,计算精度为 1.88 mmHg。目前 TDTD 技术已在多中心进行验证,其可作为一种可靠的无创 ICP 监测装置<sup>[48]</sup>。并且与其他无创 ICP 监测手段相比,TDTD 技术是利用 OA 充当 ICP 的传感器直接测出 ICP,无需校准。TDTD 技术的局限性在于其需

要特殊监测设备,测量过程需要 15 min 或更长的时间,而且不能持续测量。TDTD 技术虽然不能连续监测 ICP,但可间歇无创监测轻中度颅脑损伤患者 ICP 以调整用药方案。

### 3.4 其他监测方式

**3.4.1 脑电图** 脑电图(electroencephalogram,EEG)监测在重症颅脑损伤中最常见的适应证是难治性癫痫持续状态的管理<sup>[49]</sup>。Chen 等<sup>[50]</sup>使用 EEG 功率谱分析发现 EEG 与有创 ICP 有较好的相关性。另一项相关研究发现颅脑损伤 ICP 增高患者的神经生理上变化实际上可能早于 ICP 的变化<sup>[51]</sup>。近期韩国国立大学的研究者用猪成功设计建立了一个用定量脑电图预测创伤性 ICP 增高的实验模型<sup>[52]</sup>,并且该预测模型表现出良好的判别能力,其准确度可达到 0.773。目前 EEG 预测 ICP 的研究较少且停留在临床观察研究阶段<sup>[53]</sup>,两者间的关系可能与神经血管耦合机制相关,未来使用 EEG 联合有创 ICP 监测可能更有利于满足重症颅脑损伤患者神经血管生理功能监护的需求。

**3.4.2 近红外光谱技术** 近红外光发射到头部表面,头部组织特征的改变会影响光的吸收和扩散,光谱分析可以通过获取组织状态和估计颅内血氧饱和度的信息,从而反映大脑的代谢。这种方法也可用于检测脑组织氧合、脑血容量和脑血流量的变化,升高的 ICP 可以降低脑血流和脑氧合,因此理论上近红外光谱(near-infrared spectroscopy,NIRS)参数的变化可以用来评估 ICP 升高<sup>[54]</sup>。Ruesch 等<sup>[55]</sup>通过恒河猴模型,发现不同水平的 ICP 与 NIRS 测得的血红蛋白密切相关,并将两者用新的传递函数连接起来,将 NIRS 数据转换为非侵入性 ICP 测量值,从而反映 ICP 变化,但是并不能准确测出 ICP 数值。随后 Relander 等<sup>[56]</sup>使用猴子模型通过机器学习进一步验证并提供了 NIRS 无创测量 ICP 的理论依据。在临床研究方面,Dixon 等<sup>[57]</sup>基于 NIRS 技术开发了一种非侵入性脑脉搏监测仪并在 12 例患者中进行了预测 ICP 与有创 ICP 监测结果的对比,发现两者具有显著相关性。NIRS 可以获得颅脑组织灌注及氧合信息,对于重症颅脑损伤患者监护有重要价值,但其在 ICP 监测上的实用性仍待进一步验证。

综上所述,目前已有多种基于颅脑生理及解剖结构特点进行设计的方法可用于无创监测 ICP,所有的无创技术都有其特定优缺点,目前还没有一种方法能够满足替代有创 ICP 监测的标准,部分甚至还未开展临床使用研究或在颅脑损伤患者中研究极少。无创 ICP 监测还需要不断地进步发展来更适应临床工作。然而,对轻度颅内创伤以及保守治疗观察期的重度颅内创伤患者,不宜进行有创伤

ICP监测,此时的无创ICP监测可以发挥更多作用。无创ICP监测技术具备方便、无害的优点,可以在院前急救、急诊分诊、初筛高危患者、评估有创ICP监测必要性及间歇监测重症监护病情变化等场景中拥有更多的作用。

治疗决策不能孤立地使用一个信息来源,在本文中叙述的各种监测方式可以有机结合,多种无创ICP监测方式可以联合使用,能在颅脑损伤患者ICP监测中提供更多信息。无创ICP监测技术的持续改进发展将是未来神经生理监测方面的重要研究方向。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Kowalski RG, Hammond FM, Weintraub AH, et al. Recovery of Consciousness and Functional Outcome in Moderate and Severe Traumatic Brain Injury[J]. *Jama Neurol*, 2021, 78(5):548.
- [2] Capizzi A, Woo J, Verduzco-Gutierrez M. Traumatic Brain Injury: An Overview of Epidemiology, Pathophysiology, and Medical Management[J]. *Med Clin North Am*, 2020, 104(2):213-238.
- [3] Güiza F, Depreitere B, Piper I, et al. Visualizing the pressure and time burden of intracranial hypertension in adult and paediatric traumatic brain injury[J]. *Intensive Care Med*, 2015, 41(6):1067-76.
- [4] Ramesh VJ, Chakrabarti D. Letter: Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury, Fourth Edition[J]. *Neurosurgery*, 2018, 82(5):E143.
- [5] Hawryluk G, Citerio G, Hutchinson P, et al. Intracranial pressure: current perspectives on physiology and monitoring[J]. *Intensive Care Med*, 2022, 48(10):1471-1481.
- [6] Dattilo M. Noninvasive methods to monitor intracranial pressure[J]. *Curr Opin Neurol*, 2023, 36(1):1-9.
- [7] Müller SJ, Henkes E, Gounis MJ, et al. Non-Invasive Intracranial Pressure Monitoring [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(6):.
- [8] Dossani RH, Patra DP, Terrell DL, et al. Placement of an External Ventricular Drain [J]. *N Engl J Med*, 2021, 384(2):e3.
- [9] Aten Q, Killeffer J, Seaver C, et al. Causes, Complications, and Costs Associated with External Ventricular Drainage Catheter Obstruction[J]. *World Neurosurg*, 2020, 134:501-506.
- [10] Champey J, Mourey C, Francony G, et al. Strategies to reduce external ventricular drain-related infections: a multicenter retrospective study [J]. *J Neurosurg*, 2018:1-6.
- [11] Ficarrotta KR, Passaglia CL. Intracranial pressure modulates aqueous humour dynamics of the eye[J]. *J Physiol*, 2020, 598(2):403-413.
- [12] Tilak AM, Yang LC, Morgan J, et al. Optic nerve sheath diameter correlates to intracranial pressure in spontaneous CSF leak patients[J]. *Int Forum Allergy Rhinol*, 2023, 13(8):1518-1524.
- [13] Weidner N, Kretschmann J, Bomberg H, et al. Real-Time Evaluation of Optic Nerve Sheath Diameter (ONSD) in Awake, Spontaneously Breathing Patients [J]. *J Clin Med*, 2021, 10(16):.
- [14] Koziarz A, Sne N, Kegel F, et al. Bedside Optic Nerve Ultrasonography for Diagnosing Increased Intracranial Pressure: A Systematic Review and Meta-analysis[J]. *Ann Intern Med*, 2019, 171(12):896-905.
- [15] Lin JJ, Chen AE, Lin EE, et al. Point-of-care ultrasound of optic nerve sheath diameter to detect intracranial pressure in neurocritically ill children-A narrative review[J]. *Biomed J*, 2020, 43(3):231-239.
- [16] Giger-Tobler C, Eisenack J, Holzmann D, et al. Measurement of Optic Nerve Sheath Diameter: Differences between Methods? A Pilot Study[J]. *Klin Monbl Augenheilkd*, 2015, 232(4):467-470.
- [17] 郑曙光, 项彦斌. 床旁即时超声测量视神经鞘直径与重型颅脑损伤患者术后颅内压增高的关系研究[J]. *临床急诊杂志*, 2022, 23(10):715-719.
- [18] Chen LM, Wang LJ, Hu Y, et al. Ultrasonic measurement of optic nerve sheath diameter: a non-invasive surrogate approach for dynamic, real-time evaluation of intracranial pressure[J]. *Br J Ophthalmol*, 2019, 103(4):437-441.
- [19] Huang S, Lund T, Orchard P, et al. Dilated Optic Nerve Sheath in Mucopolysaccharidosis I: Common and Not Necessarily High Intracranial Pressure[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2023, 44(1):91-94.
- [20] Youm JY, Lee JH, Park HS. Comparison of transorbital ultrasound measurements to predict intracranial pressure in brain-injured patients requiring external ventricular drainage[J]. *J Neurosurg*, 2022, 136(1):257-263.
- [21] Rufai SR, Marmoy OR, Thompson DA, et al. Electrophysiological and fundoscopic detection of intracranial hypertension in craniosynostosis [J]. *Eye (Lond)*, 2023, 37(1):139-145.
- [22] 吴文娟, 任节, 张亮. 闪光视觉诱发电位在外伤性重型颅内出血术后患者颅内压监测中的价值[J]. *临床急诊杂志*, 2021, 22(9):614-618.
- [23] Creel DJ. Visually evoked potentials[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 9:501-522.
- [24] Oddo M, Taccone F, Galimberti S, et al. Outcome Prognostication of Acute Brain Injury using the Neurological Pupil Index(ORANGE) study: protocol for a prospective, observational, multicentre, international cohort study[J]. *BMJ Open*, 2021, 11(5):e046948.
- [25] Lele AV, Wahlster S, Khadka S, et al. Neurological Pupillary Index and Disposition at Hospital Discharge

- following ICU Admission for Acute Brain Injury[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(11):3806.
- [26] Mcnett M, Moran C, Janki C, et al. Correlations Between Hourly Pupillometer Readings and Intracranial Pressure Values[J]. *J Neurosc Nurs*, 2017, 49(4):229-234.
- [27] Stevens AR, Su Z, Toman E, et al. Optical pupillometry in traumatic brain injury; neurological pupil index and its relationship with intracranial pressure through significant event analysis[J]. *Brain Inj*, 2019, 33(8):1032-1038.
- [28] Moreno ME, Del Carpio-O'Donovan R. Neuroimaging in the diagnosis and treatment of intracranial pressure disorders[J]. *Neurol Sci*, 2023, 44(3):845-858.
- [29] Vijay V, Mollan SP, Mitchell JL, et al. Using Optical Coherence Tomography as a Surrogate of Measurements of Intracranial Pressure in Idiopathic Intracranial Hypertension[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2020, 138(12):1264-1271.
- [30] Moss HE. Retinal Vein Changes as a Biomarker to Guide Diagnosis and Management of Elevated Intracranial Pressure [J]. *Front Neurol*, 2021, 12:751370.
- [31] Morgan WH, Vukmirovic A, Abdul-Rahman A, et al. Zero retinal vein pulsation amplitude extrapolated model in non-invasive intracranial pressure estimation [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):5190.
- [32] Abdul-Rahman A, Morgan W, Jo Khoo Y, et al. Linear interactions between intraocular, intracranial pressure, and retinal vascular pulse amplitude in the fourier domain[J]. *PLoS One*, 2022, 17(6):e0270557.
- [33] Andersen MS, Pedersen CB, Poulsen FR. A new novel method for assessing intracranial pressure using non-invasive fundus images: a pilot study[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):13062.
- [34] Uryga A, Kazimierska A, Popek M, et al. Applying video motion magnification to reveal spontaneous tympanic membrane displacement as an indirect measure of intracranial pressure in patients with brain pathologies[J]. *Acta Neurochir(Wien)*, 2023, 165(8):2227-2235.
- [35] Shimbles S, Dodd C, Banister K, et al. Clinical comparison of tympanic membrane displacement with invasive intracranial pressure measurements[J]. *Physiol Meas*, 2005, 26(6):1085-1092.
- [36] Campbell-Bell CM, Sharif SJ, Zhang T, et al. A vascular subtraction method for improving the variability of evoked tympanic membrane displacement measurements[J]. *Physiol Meas*, 2021, 42(2):025001.
- [37] Wu J, He W, Chen WM, et al. Research on simulation and experiment of noninvasive intracranial pressure monitoring based on acoustoelasticity effects[J]. *Med Devices(Auckl)*, 2013, 6:123-131.
- [38] Ganslandt O, Mourtzoukos S, Stadlbauer A, et al. Evaluation of a novel noninvasive ICP monitoring device in patients undergoing invasive ICP monitoring; preliminary results[J]. *J Neurosurg*, 2018, 128(6):1653-1660.
- [39] Bershad EM, Urfy MZ, Pechacek A, et al. Intracranial pressure modulates distortion product otoacoustic emissions; a proof-of-principle study[J]. *Neurosurgery*, 2014, 75(4):445-454; discussion 454-455.
- [40] Kreitmayer C, Marcrum SC, Picou EM, et al. Subclinical conductive hearing loss significantly reduces otoacoustic emission amplitude: Implications for test performance[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2019, 123:195-201.
- [41] Redon S, Elzière M, Kaphan E, et al. Contribution of Otoacoustic Emissions for Diagnosis of Atypical Or Recurrent Intracranial Hypotension. a Cases Series [J]. *Headache J Head Face Pain*, 2019, 59(8):1374-1378.
- [42] Megihani M, Terilli K, Weinerman B, et al. A Deep Learning Framework for Deriving Noninvasive Intracranial Pressure Waveforms from Transcranial Doppler[J]. *Ann Neurol*, 2023, 94(1):196-202.
- [43] Park C, Ryu SJ, Jeong BH, et al. Real-Time Noninvasive Intracranial State Estimation Using Unscented Kalman Filter[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(9):1931-1938.
- [44] 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(7):e1002356.
- [45] Cardim D, Robba C, Czosnyka M, et al. Noninvasive Intracranial Pressure Estimation With Transcranial Doppler: A Prospective Observational Study [J]. *J Neurosurg Anesthesiol*, 2020, 32(4):349-353.
- [46] Lucinskas P, Deimantavicius M, Bartusis L, et al. Human ophthalmic artery as a sensor for non-invasive intracranial pressure monitoring: numerical modeling and in vivo pilot study [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):4736.
- [47] Killer HE. Letter: Validation of Noninvasive Absolute Intracranial Pressure Measurements in Traumatic Brain Injury and Intracranial Hemorrhage [J]. *Oper Neurosurg(Hagerstown)*, 2019, 17(6):E274-E275.
- [48] Krakauskaitė S, Petkus V, Bartusis L, et al. Accuracy, Precision, Sensitivity and Specificity of Noninvasive ICP Absolute Value Measurements [J]. *Acta Neurochirurgica Supplement*, 2016, 317-321.
- [49] Alkhachroum A, Appavu B, Egawa S, et al. Electroencephalogram in the intensive care unit: a focused look at acute brain injury [J]. *Intensive Care Med*, 2022, 48(10):1443-1462.

- drocortisone on vasopressor dose and mean arterial pressure in obese and nonobese patients with septic shock[J]. *Am J Health Syst Pharm*, 2022, 79 (Suppl 3):S94-S99.
- [25] Carabetta S, Allen B, Cannon C, et al. Abrupt discontinuation versus taper of hydrocortisone in patients with septic shock[J]. *Ann Pharmacother*, 2023, 57 (4):375-381.
- [26] Zhang S, Chang W, Xie JF, et al. The Efficacy, Safety, and Optimal Regimen of Corticosteroids in Sepsis: A Bayesian Network Meta-Analysis[J]. *Crit Care Expl*, 2020, 2:e0094.
- [27] Ammar MA, Ammar AA, Wieruszewski PM, et al. Timing of vasoactive agents and corticosteroid initiation in septic shock[J]. *Ann Intensive Care*, 2022, 12 (1):47.
- [28] Ragoonanan D, Allen B, Cannon C, et al. Comparison of Early Versus Late Initiation of Hydrocortisone in Patients With Septic Shock in the ICU Setting[J]. *Ann Pharmacother*, 2022, 56(3):264-270.
- [29] Zhang L, Gu WJ, Huang T, et al. The Timing of Initiating Hydrocortisone and Long-term Mortality in Septic Shock [J]. *Anesth Analg*, 2023, 137 (4):850-858.
- [30] König R, Kolte A, Ahlers O, et al. Use of IFN $\gamma$ /IL10 Ratio for Stratification of Hydrocortisone Therapy in Patients With Septic Shock[J]. *Front Immunol*, 12:607217.
- [31] Sweeney TE, Wong HR. Transcriptional markers in response to hydrocortisone in sepsis in ADRENAL: a step toward precision medicine [J]. *Intensive Care Med*, 2021, 47(9):1011-1013.
- [32] Cohen J, Blumenthal A, Cuellar-Partida G, et al. The relationship between adrenocortical candidate gene expression and clinical response to hydrocortisone in patients with septic shock [J]. *Intensive Care Med*, 2021, 47(9):974-983.
- [33] Wu CH, Guo L, Hao D, et al. Relative adrenal insufficiency is a risk factor and endotype of sepsis-A proof-of-concept study to support a precision medicine approach to guide glucocorticoid therapy for sepsis[J]. *Front Immunol*, 13:1110516.
- [34] Butler E, Møller MH, Cook O, et al. The effect of systemic corticosteroids on the incidence of gastrointestinal bleeding in critically ill adults: a systematic review with meta-analysis[J]. *Intensive Care Med*, 2019, 45 (11):1540-1549.
- [35] Téblick A, Bruyn LD, Oudenhove TV, et al. Impact of Hydrocortisone and of CRH Infusion on the Hypothalamus-Pituitary-Adrenocortical Axis of Septic Male Mice[J]. *Endocrinology*, 2022, 163(1):bqab222.  
(收稿日期:2023-10-24)

(上接第 92 页)

- [50] Chen H, Wang J, Mao S, et al. A new method of intracranial pressure monitoring by EEG power spectrum analysis [J]. *Can J Neurol Sci*, 2012, 39 (4):483-487.
- [51] Sanz-garcía A, Pérez-romero M, Pastor J, et al. Identifying causal relationships between EEG activity and intracranial pressure changes in neurocritical care patients[J]. *J Neural Eng*, 2018, 15(6):066029.
- [52] Kim K, Kim H, Song K, et al. Prediction of Increased Intracranial Pressure in Traumatic Brain Injury Using Quantitative Electroencephalogram in a Porcine Experimental Model[J]. *Diagnostics*, 2023, 13(3):386.
- [53] Sanz-García A, Pérez-Romero M, Pastor J, et al. [Is it possible to extract intracranial pressure information based on the EEG activity?][J]. *Rev Neurol*, 2019, 68 (9):375-383.
- [54] Ghosh A, Elwell C, Smith M. Cerebral Near-infrared Spectroscopy in Adults[J]. *Anesth Amp*, 2012, 115 (6):1373-1383.
- [55] Ruesch A, Schmitt S, Yang J, et al. Fluctuations in intracranial pressure can be estimated non-invasively using near-infrared spectroscopy in non-human primates[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2020, 40 (11):2304-2314.
- [56] Relander F, Ruesch A, Yang J, et al. Using near-infrared spectroscopy and a random forest regressor to estimate intracranial pressure [J]. *Neurophotonics*, 2022, 9(4):045001.
- [57] Dixon B, Sharkey JM, Teo EJ, et al. Assessment of a Non-invasive Brain Pulse Monitor to Measure Intracranial Pressure Following Acute Brain Injury [J]. *Med Devices, Evid Res*, 2023, 16:15-26.  
(收稿日期:2023-08-08)