

# 基于PI反应TBI患者颅内压及预后的应用现状

曲秀彬<sup>1</sup> 孙斌<sup>2\*</sup>

1. 青海大学研究生院 青海西宁 810016

2. 重症医学科, 青海省人民医院 青海西宁 810007

**摘要:** 创伤性脑损伤 (TBI) 是一个全球性的健康难题, 患者常出现颅内压 (ICP) 持续升高, 这不仅可能导致患者遭受不可逆的神经损伤, 还会给其家庭和社会带来沉重的经济负担。目前监测 ICP 的任何有创手段都无法避免感染和出血等风险。因此, 我们亟需一种及时、准确且无创的 ICP 监测方法。本文综述了经颅多普勒超声或经颅彩色双功能超声 (TCD/TCCD) 技术基于脑血流动力学的变化, 尤其是基于大脑中动脉搏动指数 (MCA-PI), 反映 ICP 变化及患者的预后, 并简略分析 TCD/TCCD 的优缺点。旨在为科学研究和临床实践提供参考依据, 以期改善 TBI 患者的监测和管理。

**关键词:** 创伤性脑损伤; 颅内压; 无创; 经颅多普勒; 搏动指数; 经颅彩色双功能超声

创伤性脑损伤 (traumatic brain injury, TBI) 是一个全球性的健康挑战, 具有高死亡率和致残率<sup>[1]</sup>。有研究表明每年全球约有 5000 万人遭受创伤性颅脑损伤, 且近三十年来, 发病率呈上升趋势, 这给社会 and 患者家庭带来了沉重的负担<sup>[2]</sup>。

颅脑创伤患者经常会出现颅内压 (intracranial pressure, ICP) 升高, ICP 持续增高可引起脑灌注压和脑血流量下降, 进而导致脑组织缺血、缺氧等一系列不可逆损伤<sup>[3-5]</sup>。既往研究也表明 ICP 升高是神经重症患者死亡的独立危险因素<sup>[6]</sup>。因此, 及时、准确地获取 ICP 数据对于指导神经重症患者的临床治疗及预估患者预后非常重要<sup>[7, 8]</sup>。

目前 ICP 监测方式主要分为有创监测和无创监测两种, 虽然我们目前一致认为有创颅内压监测技术是“金标准”<sup>[8, 9]</sup>, 但不得不考虑有创监测技术的局限性, 脑室 ICP 监测技术难度大, 经济负担高, 不适宜在经济、医疗资源欠发达地区开展, 长时间放置引流管, 增加了护理工作的难度及出血、感染等风险<sup>[10, 11]</sup>; 此外, 另一种主流的有创监测 ICP 方式: 腰椎穿刺测压法。此方式无法连续监测 ICP, 且多次测压不仅会增加患者的痛苦及经济负担, 还存在感染及诱发脑疝等风险<sup>[12]</sup>, 此外腰椎穿刺包中测压管的单位为 mmH<sub>2</sub>O, 且刻度间距多为 10mmH<sub>2</sub>O 型, 在读数中增大了误差, 其可信度及准确性大打折扣。

在过去的几十年中, 国内外学者努力寻找一种准确、稳定、经济、易于使用和便携的无创颅内压 (noninvasive intracranial pressure, nICP) 监测方法, 一般分为下列几类: 影像学、血流动力学、耳、眼和电生理学等<sup>[10]</sup>。

其中经颅多普勒超声 (transcranial doppler ultrasound, TCD) 或经颅彩色双功能超声 (transcranial color-code duplex sonography, TCCD, TCCS) 技术主要是监测脑血流动力学变化, 这是一种无创、简便、经济、易操作且可重复的工具, 用于床旁监测静态和动态脑血流和治疗反应。它由 Rune Aaslid 于 1982 年推出<sup>[13]</sup>, 八十年代末引入我国, 经过近四十年发展, TCD/TCCD 已经成为临床实践中不可或缺的检查设备。超声波穿透颅骨的主要障碍是骨骼。操作者可使用低频扇形 (2.0~3.5MHz) 超声探头, 减少骨骼引起的超声波衰减, 并通过特定颅骨声学窗口, 即骨骼足够薄, 可以让超声波穿透的地方。主要有四个声学窗口: 颞窗、眼窗、枕窗和下颌窗<sup>[14]</sup>。在其反应 ICP 的应用中, 多数情况颞窗或去骨瓣处作为首选窗口, 获取大脑中动脉 (middle cerebral artery, MCA) 的搏动指数 (pulsatility index, PI) 间接进行相应的 ICP 评估, 是目前重症医学科无创监测 ICP 的主流方法之一。

本文就目前国内外应用 TCD/TCCD 技术监测创伤性颅脑损伤患者大脑中动脉 PI 值反应 ICP 及预测患者预后进行了全面文献回顾, 并简述两种监测技术的优缺点, 以期为科学研究和临床监测颅内压提供依据。

\* 通讯作者: 孙斌

## 一、何为PI

PI是一种用于评估动脉血管壁运动和血液流动情况的超声指标。它通过经颅多普勒超声检查来测量,可以反映血管的顺应性和弹性状态。在合适的操作窗口,获取大脑中动脉收缩期峰值血流速度(peak systolic velocity, PSV)和舒张末期血流速度(end diastolic velocity, EDV)。并根据上述数据计算平均血流速度(mean blood flow velocity, MFV),其 $MFV = (PSV + 2EDV) / 3$ 。进而计算大脑中动脉搏动指数, $PI = (PSV - EDV) / MFV$ <sup>[15]</sup>。由公式我们不难看出PI主要受收缩和舒张期血流速度差的影响,这个差值越大,搏动指数也越大;反之,差值越小,搏动指数也越小。PI也用于评价血管阻力及脑血流灌注状态的高低。在颅内动脉,PI正常值约为0.65~1.10<sup>[15]</sup>。

## 二、基于MCA-PI定性评估ICP

Tao Chang<sup>[16]</sup>等人研究发现创伤性颅脑损伤病人ICP与PI在术后第3~5天有中度相关性,在术后第6、7天有强相关性且当 $PI > 1.2$ 时与ICP升高存在显著相关性。Ramazan Sar等人<sup>[17]</sup>研究发现创伤性颅脑损伤患者在接受去骨瓣减压术后1~5天内ICP和PI存在显著相关性,PI越大则ICP越高。Ningning Niu等人<sup>[18]</sup>有类似的研究发现,重度颅脑损伤患者急性期ICP与PI存在正相关,并且可以进一步联合TCD频谱、MCA-MFV先于临床诊断脑死亡,为TBI患者的治疗及器官移植提供依据。

因此早期使用TCD或TCCD监测患者动脉中动脉PI值可以很好的反映患者颅压走向,指导我们的临床诊疗,减轻患者的医疗负担。

## 三、基于MCA-PI定量评估ICP

既往也有多位学者基于MCA-PI建立了相关预测ICP的数学模型,可较为准确的估算具体ICP数值,例如方程(1) $nICP = 4.47 \times PI + 12.68$ <sup>[19]</sup>、方程(2) $nICP = 10.93 \times PI - 1.28$ <sup>[20]</sup>等。Budohoski和其同事研究提出方程(1) $nICP = 4.47 \times PI + 12.68$ ,他们收集了292名TBI患者的ICP和PI值,并运用线性回归统计分析得出ICP和nICP存在中等相关性。Bellner和其同事在81名患有各种颅脑疾病(包括动脉瘤性蛛网膜下腔出血、头部损伤和脑炎等)的患者共进行了658次TCD检查,得到方程(2) $nICP = 10.93 \times PI - 1.28$ ,基于本项研究他们亦发现ICP和PI之间存在相关性

目前我国主流的ICP监测指南建议使用Bellner和其同事提出的回归方程来估算ICP<sup>[9]</sup>。但学界亦有相反的声音,认为公式(1)的预测准确性要高于(2)<sup>[21]</sup>,甚至

认为公式(2)无法准确预测ICP<sup>[22]</sup>。造成结果不同的原因可能与PI受多方面因素影响有关,如:脑血管的不同状态、脑血管压力调节机制以及二氧化碳分压(PCO<sub>2</sub>)等因素的影响<sup>[23, 24]</sup>。

此外在中高海拔地区,海拔越高,大气压越低,这使得吸入的氧分压越低,从而使氧气更难扩散到肺部毛细血管中,进而导致动脉血氧分压和血氧饱和度下降<sup>[25]</sup>,从而使得上述因素的相互作用对ICP与PI之间的相关性产生复杂的影响更为显著<sup>[26]</sup>。有研究表明,世居青藏高原喜马拉雅山脉居民的颈内动脉血流速度为22.9cm/s,大脑中动脉血流速度为60 cm/s。与海平面对照组相比,这两个值分别高出11.7%和3.4%(平均6.2%)<sup>[27]</sup>。表明在高原缺氧环境下,脑组织提高氧供的代偿方式之一为增加脑血流。目前在中高海拔地区基于MCA-PI定量监测颅内压的研究鲜有报道,这需要我们进一步研究。

## 四、基于MCA-PI预测患者预后

Yuan Liang等人<sup>[28]</sup>研究发现TCCD监测MCA相关血流参数如PI联合年龄可以很好的预测大型DC患者术后6个月的预后。按照Glasgow Outcome Scale(GOS),分为预后良好组( $GOS \geq 4$ 分)和预后不良( $GOS \leq 3$ 分)组,后者的PI显著增高。此外我国学者许裕彬<sup>[29]</sup>研究发现类似结论,且预后良好患者PI术后7天内会逐渐减小。Mona Ammar等人<sup>[30]</sup>一项纳入32例TBI患者的前瞻性研究中发现,在颅脑超声评估的第7天,PI与CT脑水肿评分之间存在显著正相关性且经过7天的治疗后,脑水肿改善者的PI值会显著小于未改善的患存。Nida Fatima等人<sup>[31]</sup>的荟萃分析结果显示TCD异常的TBI患者( $MFV > 120$  cm/s或 $MFV < 35$  cm/s,  $PI > 1.2$ )与TCD监测正常的患者相比,出现不良临床结果的可能性要高出3倍以上。

虽然目前很多研究发现PI增大和ICP升高呈正相关,并且前文提到ICP升高是患者死亡的独立危险因素,但Tao Mei等人<sup>[32]</sup>研究发现PI与住院死亡率之间发现二者关系是非线性的,在平滑曲线拟合和广义相加模型后找到拐点 $PI = 1.11$ ,当 $PI < 1.11$ 时,PI与院内死亡呈正相关,这需要我们未来开展多中心研究验证。

随着术后患者家属对患者预后期望的不断提高,TCD/TCCD监测患者MCA-PI可以很好的帮助我们预测患者预后,给予患者家属在做医疗决策时更直观且可靠的临床资料。

## 五、TCD/TCCD的优缺点

ICP监测探头价格昂贵,部分医疗、经济资源相对

落后的地区尚未普及放置技术，TCD、TCCD均有实时、全面、经济、可重复性以及对患者进行连续、长期的动态观察的能力，是对有创ICP监测的有效替代。但二者也有其局限性如：超声波透过效果受多因素影响，部分患者声窗条件差，最终影响检查结果的准确性甚至无法获取血流信息<sup>[33]</sup>，此外二者检测结果很大程度上均受操作者的主观影响。

然而相较于TCD，TCCD有其独特的优势，首先它是在TCD的基础上增加了二维图像显像功能，此外TCCD还增加了血流角度校正功能，简化了操作流程和操作时间，更适宜在重症医学科进行床旁快速ICP监测，但其准确性非但没有降低，反而得到了提升<sup>[34-36]</sup>，更适合ICU医师及时在床旁获取准确的ICP相关数据，及时指导下一步诊疗工作。

综上所述，MCA-PI是评估TBI患者ICP及预后的重要指标。相较之下，TCCD预测ICP更简便快捷，更适合重症医学科日常监测，有助于及时救治患者。随着科技和医学的进步，人工智能也越来越多地应用于医学领域，ICP监测将朝多模态、无创化、智能化方向发展，笔者相信未来应用TCD/TCCD技术基于MCA-PI预测ICP将更快速、准确、智能，有望成为ICP监测的主流趋势之一，其中在中高海拔地区基于MCA-PI反应ICP在国内外鲜有报道，值得我们进一步开展大规模、多中心的前瞻性研究。

#### 参考文献

[1]Mostert C, Singh R D, Gerritsen M, et al. Long-term outcome after severe traumatic brain injury: a systematic literature review[J]. Acta Neurochir (Wien), 2022,164(3):599-613.

[2]Dams-O'Connor K, Juengst S B, Bogner J, et al. Traumatic brain injury as a chronic disease: insights from the United States Traumatic Brain Injury Model Systems Research Program[J]. Lancet neurology, 2023,22(6):517-528.

[3]中华医学会神经外科学分会小儿学组, 中华医学会神经外科学分会神经重症协作组, 编写委员会. 甘露醇治疗颅内压增高中国专家共识[J]. 中华医学杂志, 2019, 99(23): 1763-1766.

[4]Ravikanth R, Majumdar P. Role of Bedside Transcranial Ultrasonography in the Assessment of Cerebral Hemodynamics in Decompressive Craniectomy Patients with

Cranioplasty: A Single Centre Experience[J]. Neurology India, 2022,70(5):1840-1845.

[5]Calviello L A, Zeiler F A, Donnelly J, et al. Cerebrovascular Consequences of Elevated Intracranial Pressure After Traumatic Brain Injury[M]//DEPREITERE B, MEYFROIDT G, GÜIZA F. Cham: Springer International Publishing, 2021:43-48.

[6]Guiza 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):1067-1076.

[7]Robba C, Graziano F, Guglielmi A, et al. Treatments for intracranial hypertension in acute brain-injured patients: grading, timing, and association with outcome. Data from the SYNAPSE-ICU study[J]. Intensive care medicine, 2023,49(1):50-61.

[8]中华医学会神经病学分会神经重症协作组, 中国医师协会神经内科医师分会神经重症专业委员会. 难治性颅内压增高的监测与治疗中国专家共识[J]. 中华医学杂志, 2018, 98(45): 3643-3652.

[9]中华医学会神经外科学分会颅脑创伤专业组, 中华医学会创伤学分会神经损伤专业组. 颅脑创伤患者脑监测技术中国专家共识[J]. 中华神经外科杂志, 2020, 36(12): 1189-1194.

[10]Muller S J, Henkes E, Gounis M J, et al. Non-Invasive Intracranial Pressure Monitoring[J]. J Clin Med, 2023,12(6).

[11]Singer K E, Wallen T E, Jalbert T, et al. Efficacy of Noninvasive Technologies in Triaging Traumatic Brain Injury and Correlating With Intracranial Pressure: A Prospective Study[J]. J Surg Res, 2021,262:27-37.

[12]王亮, 李峰峰, 王东元. 去骨瓣减压术后腰椎穿刺诱发反常性脑疝1例并文献复习[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2024, 28(5): 297-300.

[13]Aaslid R, Markwalder T M, Normes H. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries[J]. J Neurosurg, 1982,57(6):769-774.

[14]刘大为, 王小亭等. 重症超声[M]. 人民卫生出版社, 2017.

[15]华扬, 惠晶晶, 邢瑛琦. 中国脑卒中血管超声检查指导规范[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2015, 12

(08): 599–610.

[16]Chang T, Yan X, Zhao C, et al. Noninvasive evaluation of intracranial pressure in patients with traumatic brain injury by transcranial Doppler ultrasound[J]. *Brain Behav*, 2021,11(12):e2396.

[17]Sari R, Bolukbasi F H, Kahraman O E, et al. Decompressive craniectomy in traumatic brain injury: Transcranial Doppler sonography used as a guide[J]. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*, 2020,26(3):418–424.

[18]Niu N, Tang Y, Hao X, et al. Non-invasive Evaluation of Brain Death Caused by Traumatic Brain Injury by Ultrasound Imaging[J]. *Frontiers in neuroinformatics*, 2020,14:607365.

[19]Budohoski K P, Schmidt B, Smielewski P, et al. Non-invasively estimated ICP pulse amplitude strongly correlates with outcome after TBI[J]. *Acta Neurochir Suppl*, 2012,114:121–125.

[20]Bellner J, Romner B, Reinstrup P, et al. Transcranial Doppler sonography pulsatility index (PI) reflects intracranial pressure (ICP)[J]. *Surg Neurol*, 2004,62(1):45–51, 51.

[21]韩帅, 李文臣, 朱富磊, 等. 经颅多普勒超声在颅脑创伤患者颅内压评估中的应用价值[J]. *中华神经外科杂志*, 2022, 38 ( 5 ): 460–465.

[22]Behrens A, Lenfeldt N, Ambarki K, et al. Transcranial Doppler pulsatility index: not an accurate method to assess intracranial pressure[J]. *Neurosurgery*, 2010,66(6):1050–1057.

[23]Gomez A, Batson C, Froese L, et al. Utility of Transcranial Doppler in Moderate and Severe Traumatic Brain Injury: A Narrative Review of Cerebral Physiologic Metrics[J]. *J Neurotrauma*, 2021,38(16):2206–2220.

[24]黄立, 张丽娜. 急性颅脑损伤救治: 不能忽视的脑血流调节功能[J]. *中华重症医学电子杂志(网络版)*, 2020, 6 ( 03 ): 248–251.

[25]陈国强, 钱睿哲. *病理生理学第10版*[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2024.

[26]Ainslie P N, Subudhi A W. Cerebral blood flow at high altitude[J]. *High Alt Med Biol*, 2014,15(2):133–140.

[27]Jansen G F, Basnyat B. Brain blood flow in Andean and Himalayan high-altitude populations: evidence of

different traits for the same environmental constraint[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2011,31(2):706–714.

[28]Liang Y, Duan Y, Xing C, et al. Clinical Value of TCCD for Evaluating the Prognosis of Patients with Severe Traumatic Brain Injury After Large Decompressive Craniectomy: A Retrospective Study[J]. *Adv Ther*, 2022,39(10):4556–4567.

[29]许裕彬. 颅内压监测联合经颅超声检查在重型颅脑创伤中的临床应用研究[J]. *影像研究与医学应用*, 2022, 6 ( 21 ): 166–168.

[30]Ammar M, Abdelmoneim W, Abdalla W. Correlation of transcranial Doppler based parameters with computed tomography assessed cerebral oedema score in patients with traumatic brain injury: A prospective observational study[J]. *Indian journal of anaesthesia*, 2023,67(2):180–185.

[31]Fatima N, Shuaib A, Chughtai T S, et al. The Role of Transcranial Doppler in Traumatic Brain Injury: A Systemic Review and Meta-Analysis[J]. *Asian J Neurosurg*, 2019,14(3):626–633.

[32]Mei T, Zhou Q, Chen L, et al. Cerebral Pulsatility Index and In-Hospital Mortality in Chinese Patients with Traumatic Brain Injury: A Retrospective Cohort Study[J]. *J Clin Med*, 2022,11(6).

[33]Duan J, Wang P, Wang H, et al. Development of a prediction model for facilitating the clinical application of transcranial color-coded duplex ultrasonography[J]. *BMC Med Imaging*, 2024,24(1):55.

[34]Gunda S T, Ng T, Liu T Y, et al. A Comparative Study of Transcranial Color-Coded Doppler (TCCD) and Transcranial Doppler (TCD) Ultrasonography Techniques in Assessing the Intracranial Cerebral Arteries Haemodynamics[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024,14(4).

[35]Rajajee V, Soroushmehr R, Williamson C A, et al. Transcranial Color-Coded Sonography With Angle Correction As a Screening Tool for Raised Intracranial Pressure[J]. *Crit Care Explor*, 2023,5(9):e0953.

[36]Dinsmore M, Venkatraghavan L. Clinical applications of point-of-care ultrasound in brain injury: a narrative review[J]. *Anaesthesia*, 2022,77 Suppl 1(S1):69–77.