

· 综述 ·

视神经鞘直径与神经重症颅内压监测的研究进展

李毓, 王丽杰

中国医科大学附属盛京医院儿内科, 辽宁 沈阳 110004

摘要: 儿童神经重症发生率及病死率高,没有单一的治疗可以预防神经重症带来的不良预后,早期发现及降低颅内压可预防继发性脑损伤,最大程度地减少不良预后。超声监测视神经鞘直径作为一种无创、安全、快速、有效的监测方法,与颅内压变化有极好的相关性,可作为动态监测颅内压及指导神经重症治疗的方法选择。

关键词: 神经重症监测; 颅内压; 视神经鞘

中图分类号: R742 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-8182(2021)09-1257-04

神经重症包括急性脑血管疾病、颅脑外伤、重症神经系统感染、癫痫持续状态等一类疾病,对病人神经功能有重大损害。神经重症病因复杂,治疗难度大,占儿科重症入院人数的20%~25%,死亡率高达12%,预后不良者约占21%,住院时间长,费用高^[1]。其中创伤性脑损伤(trumatic brain injury, TBI)是全球儿童发病率和死亡率较高的神经重症,因TBI而接受急诊治疗的儿童为691/100 000,住院治疗的占74/100 000,因TBI而死亡的儿童为9/100 000^[2]。中国因TBI死亡的为13/100 000^[3],神经重症不仅死率高,而且容易遗留严重后遗症,与成人相比,儿童神经重症治疗面临更艰巨的挑战,神经系统后遗症对神经发育的影响可能需要数年来评估^[4]。随着现代医学的发展,儿科神经重症监测及治疗已经进入新的时代,神经重症治疗的主要任务是危重期颅内压(intracranial pressure, ICP)管理和脑功能的支持,预防继发性脑损伤,最大限度地减少不良神经后果^[5]。目前没有单一的干预可以治疗神经重症带来的严重后果,但是优化脑代谢环境和脑灌注压(cerebral perfusion pressure, CPP)可以预防继发性脑损伤,改善神经预后^[6]。ICP可反映CPP及脑代谢环境,早期发现和降低ICP可以预防继发性脑损伤^[7-8],ICP稳定也是治疗神经重症其他症状的前提,由此可见ICP监测是神经重症治疗的重要内容。目前脑室外引流(ventricular drainage, EVD)是评估ICP的金标准,但这种侵入性操作在儿童,特别是婴儿人群中,可能导致多种并发症,如出血、感染和导管移位等^[9-10],引起不良预后,家属接受度不高。但是儿童大脑相对于成人来说,对ICP的变化更加敏感,所以迫切需要一种无创的方法监测儿童ICP^[11],超声测量视神经鞘直径(optic nerve sheath diameter, ONSD)作为一种安全、快速、有效、动态的无创技术,已被用于神经重症的颅内压监测。

1 神经重症监测

神经重症患者需要全身及专科功能评估及多项监测,如

心率、血压、呼吸、血氧及神经系统专科查体和神经功能监测。神经重症患者的脑组织损伤、脑血流自动调节受损以及伴随炎症介质、氧化应激和血管痉挛的脑代谢改变等可导致继发性脑损伤,如缺血、水肿、癫痫发作和脑积水等^[8],继发性脑损伤是神经重症患者的主要死亡原因,目前通过对ICP和CPP监测、脑血流动力学监测、脑代谢监测、连续脑电图监测、脑氧监测等可减少继发性脑损伤^[12],其中最重要的是ICP和CPP监测。ICP和CPP一定程度上可反映脑血流量(cerebral blood flow, CBF),大脑可通过静态和动态两种自动调节模式维持CBF稳定,进而可以预防ICP增高、缺血、充血和缺氧导致的继发性脑损伤^[13],ICP增高本身也会因脑缺血或脑疝引起脑损伤^[14]。Talving等^[15]的一项前瞻性研究,把研究人群分为ICP监测组和无ICP监测组,发现未接受ICP监测的TBI患者的死亡率明显增高,分别为53.9%,32.7%。未接受ICP监测组因脑疝导致的死亡率也明显增高,分别为21.7%,12.9%。Balestreri等^[16]研究神经重症监护室429名脑损伤患者的ICP和CPP对患者预后的影响,发现ICP超过20 mm Hg时,死亡率从17%增加至47%,且死亡患者的ICP高于存活患者,CPP低于存活患者。Saul等^[17]发现进行颅内压监测的TBI患者中,ICP 15 mm Hg开始治疗的死亡率为28%,20~25 mm Hg开始治疗的死亡率为46%。在ICP升高早期干预和监测可降低患者死亡率及改善预后。

2 颅内压监测

Monro-Kellie学说认为颅腔是相对密封固定的,其中包括脑组织、脑脊液(cerebrospinal fluid, CSF)和血液,它们的体积之和恒定,当任何一种成分体积增加时,其他成分就会减少,进而起到代偿作用。其中CSF和颅内血液最容易调节^[18],当代偿能力耗尽时可导致ICP增高^[19]。ICP监测方法可分为有创和无创两种方法,有创ICP监测包括脑室内、脑实质内、蛛网膜下腔、硬脑膜下、硬脑膜外监测。无创ICP监测包括

ONSD 测量、脑电图、经颅多普勒超声、脑血流速度、近红外光谱、诱发电位、瞳孔测量等方法。

有创 ICP 监测方法中, EVD 是监测 ICP 增高的“金标准”^[9, 20], 将脑室引流管放入侧脑室, 使其顶端位于室间孔, 另一端连接外部压力传感器测量, 其优点是准确性高, 可以实时监测 ICP 及脉搏、血压、中心静脉压, 还可以通过引流 CSF 降低 ICP, 同时方便颅内给药及 CSF 化验, 其缺点是引流管放置位置要求精确, 对操作人员技术要求高, 当脑室移位、受压或变小时, 放置引流管将更加困难, 还可以导致感染、出血、CSF 漏等相关并发症^[9], 其中脑室造瘘术相关感染是 EVD 常见的并发症^[21], Lozier 等^[22]对 MEDLINE 数据库的 60 年间的数据进行 Meta 分析, 发现脑室造瘘术相关感染的发生率约为 0%~22%, 大多数在 10% 左右。也有研究认为有创 ICP 监测不适合长时间进行, 监测时间越长, 感染风险越大^[23]。

近红外光谱 (near-infrared spectroscopy, NIRS) 是一种无创、直接、实时地监测脑组织氧合及灌注的技术。NIRS 是利用大脑皮质内氧合血红蛋白 (oxygenated haemoglobin, HbO₂)、脱氧血红蛋白 (deoxyhemoglobin, DHb) 对近红外线吸收光谱不同进行测量, 可以监测脑组织氧合、脑血容量 (CBV) 和 CBF 的变化来反映 ICP^[24]。Budohoski 等^[25]发现当颅内压变化时, NIRS 参数可较早地预测 ICP 增高。Weerakkody 等^[26]发现 DHb 和 HbO₂ 相关变化可能是监测血管源性 ICP 的无创方法。然而, 关于 NIRS 监测 ICP 变化的敏感性的数据却很少。

经颅多普勒超声 (transcranial doppler, TCD) 是在颅骨薄弱部位作为检查声窗, 实时监测脑主要动脉的血流动力学和一系列生理参数, 如血流方向、血流速度 (flow velocity, FV)、脉动指数 (Pulsatility index, PI)、阻抗指数等。当 ICP 增高时, CPP 降低, 血流阻力增加, FV 减慢, PI 增高, 所以 TCD 可用于监测 ICP, 具有无创、安全、重复性好、可床旁操作等优点。一些研究结果显示 ICP 与 PI 相关系数为 0.31 至 0.82^[27-28], Fernando 等^[29]对包括 Medline、EMBASE 和 PubMed 在内的六个数据库进行多年的系统回顾与 Meta 分析, 比较多种方法在 ICP 增高诊断的准确性, 发现经颅多普勒脉动指数的接受者操作特征曲线下面积 (AUC) 值在 0.550 到 0.718 之间, 并且 TCD 监测脑血流时对操作者技术要求很高, 超声探头方向发生微小变化也会对结果产生影响。当患者遭受严重颅骨创伤、颅内压增高由脑脊液循环紊乱或脑实质体积增加引起时, TCD 监测 ICP 可能受限。而 ONSD 评估 ICP 增高的 AUC 值为 0.94 (95%CI: 0.91~0.96), 操作技术要求不高, 重复性好。

3 ONSD 测量

3.1 ONSD CSF 是维持稳定 ICP 的重要成分。CSF 由脑室脉络丛分泌, 从侧脑室流向第三脑室, 通过中脑导水管流入第四脑室, 最后进入蛛网膜下腔, 并被蛛网膜颗粒吸收至上矢状窦。近期研究发现 CSF 运动要复杂得多, Matsumae 等^[30]使用 MRI 技术观察 CSF 的运动, 发现 CSF 运动是 CSF 在脑室和蛛网膜下腔各种流动方向的结合, Brinker 等^[31]还发现, CSF 循环还包括血液、间质液和 CSF 之间的双向液体交换, 维持大

脑、脊髓、神经系统以及淋巴和血管系统之间的交流, 从而起到调节 CSF 体积、输送营养物质和清除代谢废物等作用。CSF 吸收途径很多, 如蛛网膜颗粒或绒毛、脊神经根和脑实质的毛细血管等。Killer 等^[32]发现视神经硬脑膜中毛细淋巴管可能是 CSF 的吸收途径。大脑底部的蛛网膜下腔内 CSF 流入脚间池和交叉池, 最后经视神经管进入眶内视神经的蛛网膜下腔。若 ICP 增高, 颅内充盈的 CSF 流入蛛网膜下腔, 从而导致视神经鞘扩张^[33], 因此, ONSD 可在一定程度上反应 ICP。监测 ONSD 常用的方法有超声、CT、MRI。Blaivas 等^[34]对 CT 提示 ICP 增高的患者使用超声监测 ONSD, 发现 ONSD 增加与 CT 提示的 ICP 增高之间相关性好, ONSD 评估 ICP 增高的灵敏度为 87.5%, 特异度为 94.1%, ROC 曲线下面积为 0.90 (95%CI: 0.85~0.96)。MRI、CT、超声技术均可用于监测 ICP 升高^[35], 但前两种价格昂贵、耗时、有少量辐射。而超声具有操作简单、易于学习、重复性好、价格低廉、操作者内和操作者间误差很小^[36], 有利于在临床中推广。

3.2 检测方法 ONSD 扩张在眼球后 3 mm 处最明显, 因此 ONSD 测量常在眼球后方 3 mm 处进行^[37]。不同人的视神经鞘对 ICP 增高敏感程度不同, 左右眼视神经鞘也可能不同^[38], 一些疾病也会影响 ONSD, 所以在进行 ONSD 测量前, 要排除如先天性眼球缺损或小眼球; 合并眼损伤、视神经损伤或视神经管骨折; 视神经炎以及与异常眼压相关的疾病等。有研究认为操作者对超声监测 ONSD 影响很小, 但操作过程中应该注意伪影和眼球位置对 ONSD 的影响^[39], Vaiman 等^[40]发现受试者眼球运动影响视神经, 从而影响视神经鞘, 操作过程中应使患者眼球正视前方, 获得准确的 ONSD。

3.3 评估 ICP 增高的 ONSD 临界值 目前对 ONSD 评估 ICP 增高的临界值没有统一标准, Kerscher 等^[41]发现儿童 ONSD 与 ICP 增高相关性好 ($r=0.52, P<0.01$), 大于 1 岁和小于 1 岁儿童 r 值分别为 0.63、0.21, 所以用 ONSD 评估 ICP 增高时应考虑年龄的因素。Newman 等^[42]对 102 名 0~15 岁的健康儿童绘制视神经生长曲线, 发现 1 岁内 ONSD 增长最快, 且 1 岁以下儿童的平均 ONSD 为 2.9 mm (2.2~3.4 mm), 1 岁及以上儿童的平均 ONSD 为 3.1 mm (2.3~4.0 mm), 提出 ONSD 在 1 岁以下儿童大于 4 mm, 1 岁及以上儿童大于 4.5 mm 考虑 ICP 增高。Fontanel 等^[43]对 0~18 岁的 215 名受试者的研究发现, ONSD 在 10 岁前呈递增趋势, 认为 4~10 岁和 11~18 岁两个年龄组 ONSD 临界值分别为 4.1、4.4 mm 最佳, 灵敏度为 100%, 特异度分别为 83.9%、98.8%。Ohle 等^[44]通过对 PubMed、EMBASE 和 Cochrane 数据库中 17 年数据进行系统回顾及 Meta 分析, ONSD 临界值 <1 岁儿童为 4 mm, ≥1 岁者为 4.5 mm 提示 ICP 增高, ROC 曲线下面积为 0.90 (95%CI: 0.85~0.96), 灵敏度为 87.5%, 特异度为 94.1%。Kimberly 等^[45]发现 ONSD 大于 5 mm 评估 ICP 是很好的临界值, ROC 曲线下面积为 0.93, 灵敏度为 88%, 特异性为 93%。这些研究表明, 超声监测 ONSD 可能是评估颅内压的有效方法, 但超声监测 ONSD 评估儿童 ICP 没有统一的标准, 目前最常使用的 ONSD 临界值是, 1 岁以下儿童为 4 mm, 1~4 岁儿童为

4.5 mm, 4岁以上儿童及成人为5mm^[42,46]。

3.4 ONSD的应用 Maissan等^[47]研究了TBI患者在气管插管操作期间ONSD和ICP的相关性($r=0.80$),发现气管刺激期间ICP升高,操作停止后ICP和ONSD迅速降至基线水平。Liu等^[48]研究110名腰椎穿刺监测ICP的患儿,同时使用超声监测ONSD,证实了ICP与ONSD的相关性($r=0.61$),ONSD预测ICP的灵敏度和特异度分别为84.5%~85.7%和86.5%~92.3%。王思博等^[49]的研究发现脑炎患者ICP与ONSD有很好的相关性($r=0.87$)。王蕾等^[50]也提出监测ONSD可较好地评估ICP增高。

Launey等^[51]研究13名ICP增高患者使用甘露醇治疗前后ONSD变化,治疗前后平均ICP从35 mm Hg降至25 mm Hg,平均ONSD从6.3 mm降至5.7 mm。Bhandari等^[52]研究脑室腹腔分流术治疗的脑积水患者,发现儿童治疗后ONSD从(4.76±1.14)mm降至(3.90±1.08)mm($P<0.01$),提示超声监测ONSD可能有助于评估降低颅内压的疗效。Liu等^[53]把ONSD为5.09 mm作为选择手术治疗降低颅内压的时机。TBI常导致ICP增高,Anania等^[54]通过监测ONSD,确定停止侵入性监测ICP的时机,降低有创监测的感染风险,利用无创超声监测ONSD替代有创监测方法。

早期监测及治疗ICP增高可降低儿童神经重症患者死亡率,改善预后,虽然EVD是监测ICP的金标准,但是临床应用无法普及,超声监测ONSD作为一种无创、安全、可重复的方法,可相对准确的反映儿童ICP变化,动态监测颅内压并指导治疗。国内外大量的研究已经证实了ONSD和ICP的相关性,但对于超声监测ONSD指导ICP增高治疗的研究不是很多,还需要我们更深入的研究。

参考文献

- [1] Williams CN, Piantino J, McEvoy C, et al. The burden of pediatric neurocritical care in the United States[J]. *Pediatr Neurol*, 2018, 89: 31-38.
- [2] Thurman DJ. The epidemiology of traumatic brain injury in children and youths: a review of research since 1990[J]. *J Child Neurol*, 2016, 31(1): 20-27.
- [3] Jiang JY, Gao GY, Feng JF, et al. Traumatic brain injury in China[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(3): 286-295.
- [4] Araki T, Yokota H, Morita A. Pediatric traumatic brain injury: characteristic features, diagnosis, and management[J]. *Neurol Medico Chir*, 2017, 57(2): 82-93.
- [5] Murphy S. Pediatric neurocritical care[J]. *Neurotherapeutics*, 2012, 9(1): 3-16.
- [6] 陈志颖. 重视脑出血后血肿周围灌注和氧合能力改变[J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2020, 22(8): 785-787.
- [7] Glass HC, Ferriero DM, Rowitch DH, et al. The neurointensive nursery: concept, development, and insights gained[J]. *Curr Opin Pediatr*, 2019, 31(2): 202-209.
- [8] Greve MW, Zink BJ. Pathophysiology of traumatic brain injury[J]. *Mt Sinai J Med*, 2009, 76(2): 97-104.
- [9] Nag DS, Sahu S, Swain A, et al. Intracranial pressure monitoring: Gold standard and recent innovations[J]. *World J Clin Cases*, 2019, 7(13): 1535-1553.
- [10] Narayan V, Mohammed N, Savardekar AR, et al. Noninvasive intracranial pressure monitoring for severe traumatic brain injury in children: a concise update on current methods[J]. *World Neurosurg*, 2018, 114: 293-300.
- [11] Young AM, Guilfoyle MR, Donnelly J, et al. Correlating optic nerve sheath diameter with opening intracranial pressure in pediatric traumatic brain injury[J]. *Pediatr Res*, 2017, 81(3): 443-447.
- [12] Stuart RM, Schmidt M, Kurtz P, et al. Intracranial multimodal monitoring for acute brain injury: a single institution review of current practices[J]. *Neurocritical Care*, 2010, 12(2): 188-198.
- [13] Vella MA, Crandall ML, Patel MB. Acute management of traumatic brain injury[J]. *Surg Clin North Am*, 2017, 97(5): 1015-1030.
- [14] Harary M, Dolmans RGF, Gormley WB. Intracranial pressure monitoring—review and avenues for development[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 465.
- [15] Talving P, Karamanos E, Teixeira PG, et al. Intracranial pressure monitoring in severe head injury: compliance with Brain Trauma Foundation guidelines and effect on outcomes: a prospective study[J]. *J Neurosurg*, 2013, 119(5): 1248-1254.
- [16] Balestreri M, Czosnyka M, Hutchinson P, et al. Impact of intracranial pressure and cerebral perfusion pressure on severe disability and mortality after head injury[J]. *Neurocritical Care*, 2006, 4(1): 8-13.
- [17] Saul TG, Ducker TB. Effect of intracranial pressure monitoring and aggressive treatment on mortality in severe head injury[J]. *J Neurosurg*, 1982, 56(4): 498-503.
- [18] Mokri B. The Monro-Kellie hypothesis: applications in CSF volume depletion[J]. *Neurology*, 2001, 56(12): 1746-1748.
- [19] Canac N, Jaleddini K, Thorpe SG, et al. Review: pathophysiology of intracranial hypertension and noninvasive intracranial pressure monitoring[J]. *Fluids Barriers CNS*, 2020, 17(1): 40.
- [20] Evensen KB, Eide PK. Measuring intracranial pressure by invasive, less invasive or non-invasive means: limitations and avenues for improvement[J]. *Fluids Barriers CNS*, 2020, 17(1): 34.
- [21] Sheppard JP, Ong V, Lagman C, et al. Systemic antimicrobial prophylaxis and antimicrobial-coated external ventricular drain catheters for preventing ventriculostomy-related infections: a meta-analysis of 5242 cases[J]. *Neurosurgery*, 2020, 86(1): 19-29.
- [22] Lozier AP, Sciaccia RR, Romagnoli MF, et al. Ventriculostomy-related infections: a critical review of the literature[J]. *Neurosurgery*, 2002, 51(1): 170-81; discussion 181.
- [23] Kim JH, Desai NS, Ricci J, et al. Factors contributing to ventriculostomy infection[J]. *World Neurosurg*, 2012, 77(1): 135-140.
- [24] Narayan V, Mohammed N, Savardekar AR, et al. Noninvasive intracranial pressure monitoring for severe traumatic brain injury in children: a concise update on current methods[J]. *World Neurosurg*, 2018, 114: 293-300.
- [25] Budohoski KP, Zweifel C, Kasprowitz M, et al. What comes first? The dynamics of cerebral oxygenation and blood flow in response to changes in arterial pressure and intracranial pressure after head injury

- [J]. *Br J Anaesth*, 2012, 108(1):89-99.
- [26] Weerakkody RA, Czosnyka M, Zweifel C, et al. Near infrared spectroscopy as possible non-invasive monitor of slow vasogenic ICP waves [J]. *Acta Neurochir Suppl*, 2012, 114:181-185.
- [27] 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(4):853-861.
- [28] Voulgaris SG, Partheni M, Kaliora H, et al. Early cerebral monitoring using the transcranial Doppler pulsatility index in patients with severe brain trauma [J]. *Med Sci Monit*, 2005, 11(2):CR49-CR52.
- [29] Fernando SM, Tran A, Cheng W, et al. Diagnosis of elevated intracranial pressure in critically ill adults; systematic review and meta-analysis [J]. *BMJ Clin Res Ed*, 2019, 366:l4225.
- [30] Matsumae M, Kuroda K, Yatsushiro S, et al. Changing the currently held concept of cerebrospinal fluid dynamics based on shared findings of cerebrospinal fluid motion in the cranial cavity using various types of magnetic resonance imaging techniques [J]. *Neurol Med Chir (Tokyo)*, 2019, 59(4):133-146.
- [31] Brinker T, Stopa E, Morrison J, et al. A new look at cerebrospinal fluid circulation [J]. *Fluids Barriers CNS*, 2014, 11:10.
- [32] Killer HE, Laeng HR, Groscurth P. Lymphatic capillaries in the meninges of the human optic nerve [J]. *J Neuro Ophthalmol*, 1999, 19(4):222-228.
- [33] Hansen H, Helmke K. The subarachnoid space surrounding the optic nerves. An ultrasound study of the optic nerve sheath [J]. *Surg Radiol Anat*, 1996, 18(4):323-328.
- [34] Blaivas M, Theodoro D, Sierzenski PR. Elevated intracranial pressure detected by bedside emergency ultrasonography of the optic nerve sheath [J]. *Acad Emerg Med*, 2003, 10(4):376-381.
- [35] 乐元洁, 贲志飞. 床旁超声和 CT 重建测量视神经鞘直径监测颅内压的比较研究 [J]. *浙江医学*, 2017, 39(10):819-823, 830.
- [36] Betcher J, Becker TK, Stoyanoff P, et al. Military trainees can accurately measure optic nerve sheath diameter after a brief training session [J]. *Mil Med Res*, 2018, 5(1):42.
- [37] 王宁利, 刘含若, 庞睿奇, 等. 基于经眶超声的无创颅内压及眼内压压力梯度测量方法的操作规范 [J]. *中华眼科医学杂志(电子版)*, 2019, 9(1):61-64.
- [38] Naldi A, Provero P, Vercelli A, et al. Optic nerve sheath diameter asymmetry in healthy subjects and patients with intracranial hypertension [J]. *Neurol Sci*, 2020, 41(2):329-333.
- [39] Copetti R, Cattarossi L. Optic nerve ultrasound: artifacts and real images [J]. *Intensive Care Med*, 2009, 35(8):1488-1490.
- [40] Vaiman M, Gottlieb P, Bekerman I. Quantitative relations between the eyeball, the optic nerve, and the optic canal important for intracranial pressure monitoring [J]. *Head Face Med*, 2014, 10:32.
- [41] Kerscher SR, Schöni D, Hurth H, et al. The relation of optic nerve sheath diameter (ONSD) and intracranial pressure (ICP) in pediatric neurosurgery practice-Part I: Correlations, age-dependency and cut-off values [J]. *Childs Nerv Syst*, 2020, 36(1):99-106.
- [42] Newman WD, Hollman AS, Dutton GN, et al. Measurement of optic nerve sheath diameter by ultrasound: a means of detecting acute raised intracranial pressure in hydrocephalus [J]. *Br J Ophthalmol*, 2002, 86(10):1109-1113.
- [43] Fontanel L, Pensiero S, Ronfani L, et al. Optic nerve sheath diameter ultrasound; optic nerve growth curve and its application to detect intracranial hypertension in children [J]. *Am J Ophthalmol*, 2019, 208:421-428.
- [44] Ohle R, McIsaac SM, Woo MY, et al. Sonography of the optic nerve sheath diameter for detection of raised intracranial pressure compared to computed tomography [J]. *J Ultrasound Med*, 2015, 34(7):1285-1294.
- [45] Kimberly HH, Shah S, Marill K, et al. Correlation of optic nerve sheath diameter with direct measurement of intracranial pressure [J]. *Acad Emerg Med*, 2008, 15(2):201-204.
- [46] Tsung JW, Blaivas M, Cooper A, et al. A rapid noninvasive method of detecting elevated intracranial pressure using bedside ocular ultrasound; application to 3 cases of head trauma in the pediatric emergency department [J]. *Pediatr Emerg Care*, 2005, 21(2):94-98.
- [47] Maissan IM, Dirven PJ, Haitsma IK, et al. Ultrasonographic measured optic nerve sheath diameter as an accurate and quick monitor for changes in intracranial pressure [J]. *J Neurosurg*, 2015, 123(3):743-747.
- [48] Liu DC, Li Z, Zhang XX, et al. Assessment of intracranial pressure with ultrasonographic retrobulbar optic nerve sheath diameter measurement [J]. *BMC Neurol*, 2017, 17(1):188.
- [49] 王思博, 邢英琦, 王翠翠, 等. 经颅多普勒超声及超声测量视神经鞘直径与脑炎患者颅内压增高的相关性 [J]. *中国脑血管病杂志*, 2020, 17(6):315-319.
- [50] 王蕾, 张毅, 彭强. 超声检测视神经鞘直径在颅高压病人中的应用 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2019, 24(6):277-278.
- [51] Launey Y, Nessler N, Le Maguet P, et al. Effect of osmotherapy on optic nerve sheath diameter in patients with increased intracranial pressure [J]. *J Neurotrauma*, 2014, 31(10):984-988.
- [52] Bhandari D, Udipi Bidkar P, Adinarayanan S, et al. Measurement of changes in optic nerve sheath diameter using ultrasound and computed tomography scan before and after the ventriculoperitoneal shunt surgery in patients with hydrocephalus—A prospective observational trial [J]. *Br J Neurosurg*, 2019, 33(2):125-130.
- [53] Liu M, Yang ZK, Yan YF, et al. Optic nerve sheath measurements by computed tomography to predict intracranial pressure and guide surgery in patients with traumatic brain injury [J]. *World Neurosurg*, 2020, 134:e317-e324.
- [54] Anania P, Battaglini D, Miller JP, et al. Escalation therapy in severe traumatic brain injury: how long is intracranial pressure monitoring necessary? [J]. *Neurosurg Rev*, 2020:1-9.