

脑水肿监测在儿童常见神经内科疾病中的发展及应用

艾渝青, 许 峰*

重庆医科大学附属儿童医院重症医学科, 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心, 儿童发育疾病研究教育部重点实验室, 儿童代谢与炎症性疾病重庆市重点实验室, 重庆

收稿日期: 2025年2月13日; 录用日期: 2025年3月7日; 发布日期: 2025年3月14日

摘 要

脑水肿是一种非特异性的大脑病理性肿胀, 任何类型的神经损伤后都可能发展为局灶性或弥漫性脑水肿。脑水肿可继发于临床上各种颅脑损伤, 其也是颅脑损伤患者入院后死亡或残疾的主要原因之一。颅内压(ICP)是颅内内容物(脑组织、血液、脑脊液)对颅腔侧壁产生的压力, 脑水肿也被认为是颅内压(ICP)升高的常见原因之一, 颅内高压是儿科常见的急危重症, 所以脑水肿的早期识别和治疗是管理颅内病变的关键核心。本文主要探讨脑水肿监测在儿童神经内科疾病中的发展及应用。

关键词

脑水肿, 儿童, 颅内高压

Development and Application of Brain Edema Monitoring in Common Neurological Diseases in Children

Yuqing Ai, Feng Xu*

Department of Intensive Care Unit, Children's Hospital of Chongqing Medical University, National Clinical Research Center of Child Health and Disorders, Ministry of Education Key Laboratory of Child Development and Disorders, Chongqing Key Laboratory of Pediatric Metabolism and Inflammatory Diseases, Chongqing

Received: Feb. 13th, 2025; accepted: Mar. 7th, 2025; published: Mar. 14th, 2025

Abstract

Cerebral edema is a nonspecific pathologic swelling of the brain that may develop into focal or

*通讯作者。

文章引用: 艾渝青, 许峰. 脑水肿监测在儿童常见神经内科疾病中的发展及应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(3): 1357-1365. DOI: 10.12677/acm.2025.153750

diffuse cerebral edema after any type of neurological injury. Cerebral edema can occur secondary to a variety of clinical craniocerebral injuries, and it is also one of the leading causes of death or disability in patients with craniocerebral injuries on admission to the hospital. Intracranial pressure (ICP) is the pressure exerted by intracranial contents (brain tissue, blood, cerebrospinal fluid) against the lateral walls of the cranial cavity, and cerebral edema is also considered to be one of the common causes of elevated intracranial pressure (ICP). Intracranial hypertension is a common acute and critical condition in pediatrics, so early identification and treatment of cerebral edema is a critical core of managing intracranial lesions. This article focuses on the development and application of cerebral edema monitoring in pediatric neurological disorders.

Keywords

Brain Edema, Children, Intracranial Hypertension

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脑水肿是一种非特异性的大脑病理性肿胀,其可以继发于临床上各种颅脑损伤,也是颅脑损伤患者入院后死亡或残疾的主要原因之一。脑水肿可继发于血脑屏障破坏、局部炎症、血管变化或细胞代谢改变[1]。脑水肿可引起细胞肿胀、改变细胞代谢内环境等使颅内压(ICP)明显升高,ICP是颅内内容物(脑组织、血液、脑脊液)对颅腔侧壁产生的压力,颅内高压是儿科常见的急危重症[2],与此同时(ICP)明显升高时可导致脑组织血流灌注减少,甚至形成脑疝压迫脑干呼吸、循环中枢而危及生命[3]。所以儿童脑水肿的早期识别和治疗是减少颅脑损伤患儿神经系统不可逆损伤的重要环节,因此脑水肿监测是脑水肿发生后必不可少的重要环节。

2. 脑水肿的分类

1967年Klatzo把脑水肿分为不伴有血脑屏障(blood brain barrier)破坏的细胞障碍性水肿,又称细胞毒性水肿和伴有血脑屏障破坏的血管源性水肿[4]。现普遍认为脑水肿分为四种类型,分别为细胞毒性脑水肿、血管源性脑水肿、间质性脑水肿、渗透性脑水肿。

细胞毒性水肿是由于离子泵故障或特定离子通道激活引起的离子浓度失衡,最终导致水从细胞间液转移至细胞内[5]-[7],脑组织缺血或缺氧都会引起脑组织能量代谢障碍,使细胞膜“钠泵”功能障碍,引起脑组织的水和电解质紊乱,导致细胞内钾离子外移,细胞间液的钠离子、氯离子和水移入细胞内,进而形成细胞肿胀。就细胞毒性脑水肿本身而言,仅仅是细胞外液积聚在细胞内,进而引起细胞体积增大、细胞间隔减小,但是脑组织总体积没有增加,所以颅内压不会明显增高[8]。儿童缺氧缺血性脑病早期继发性脑水肿就属于细胞毒性脑水肿,但随着脑水肿的发展,血管源性脑水肿逐渐出现[8]。

血管源性脑水肿是由于脑组织内血脑屏障结构或功能性障碍导致。血脑屏障(BBB)是脑组织与血液间物质交换的扩散性屏障,可以调节中枢神经系统的生理平衡,保持脑组织神经细胞活动的内环境稳定。当血脑屏障结构或功能障碍时,毛细血管壁通透性增加,使血管中的血浆蛋白、水、电解质等外溢到脑组织细胞间隙,导致神经细胞内环境失衡而引起血管源性脑水肿。实验性冷冻脑损伤以及出血性脑损伤都会引发血管源性脑水肿[8]-[10]。创伤性脑水肿中,早期研究认为血脑屏障破坏产生血管源性水肿是其

主要机制,但随着实验模型越来越具体,逐渐提示创伤性脑水肿是种复合性损伤,并且通过 MRI 血脑屏障渗透性检测技术观察到在创伤性脑损伤最初 4~6 小时以血管源性水肿为主,之后由细胞毒性水肿占主导地位并持续 2 周左右,血管源性水肿则逐渐减弱[5]。由此可见这两种脑水肿一般不独立存在,而是相互交替占主导地位。

间质性脑水肿是指脑脊液从脑室内空间流出到脑间质区域,导致脑脊液(CSF)和大脑的压力增加,液体积聚在大部分白质的细胞外空间,而形成的脑水肿。脑积水及脑膜炎患者大多为此类型脑水肿[11]。

渗透性脑水肿通常由于电解质紊乱导致渗透性改变,如低钠血症、糖尿病酮症酸中毒(DKA)等类似代谢性疾病,在这些情况下,水由血浆渗透至大脑细胞中,从而导致广泛脑水肿[11]。

近期也有国外文献提出另一种脑水肿类型,称为离子性脑水肿(ionic edema),这是一种在细胞毒性水肿与血管源性水肿转变之间而观察到的一种脑水肿[12]。

而对于上述几种不同类型的脑水肿,对应的治疗策略也完全不同,所以早期准确识别脑水肿并监测脑水肿进展,对于儿童颅脑损伤患者具有重要的临床意义。

3. 脑水肿监测技术

根据监测原理,可以将脑水肿监测技术分为间接监测及直接监测。其中间接监测即通过颅内压监测、脑灌注等从而反映脑水肿程度;直接监测包括神经影像学成像、近红外光谱技术、生物电阻抗监测技术等[13]。

3.1. 有创颅内压监测技术

脑水肿发生时,颅内压通常无法代偿调节,进而出现颅内压升高[14],所以可以通过监测颅内压推算脑水肿的发展。体外脑室引流(EVD)及脑实质内探针被认为是侵入性颅内压监测的两种金标准方法[15]。体外脑室引流是通过一根导管放至侧脑室中,并于另一端连接压力传感器,必要时可以进行脑脊液引流而降低颅内压[16]。EVD 技术现虽被认为是一种较小的外科手术,但由于是侵入性操作,仍会出现许多并发症,如出血和感染等。国外由 Catherine Miller 等人开展一项研究表明[17],在 73 例 EVD 放置手术中,出血的发生率为 10%。脑实质内探针有三种类型:光纤、应变计和气动传感器,这些探针与 EVD 一样准确,但它们在放置后无法像 EVD 一样重复调整及校准[18]。并且放置脑实质内探针也涉及外科手术,故和 EVD 一样,也具有相应并发症的风险[19]。除上述两种侵入性监测颅内压金标准方法外,腰椎穿刺也可以用于测量 ICP,但它只能提供操作时 ICP 的数值,不能进行动态颅内压监测[20]。

3.2. 经颅多普勒超声(TCD)监测技术

经颅多普勒超声检查(TCD)由 Aaslid 等人[21]最先提出,是一种测量脑血流速度与灌注的工具,通常用来评估大脑中动脉速度。当脑水肿发生时,颅内血管血流速度会由于水肿部分的压迫作用而发生相应改变,现有研究发现,在创伤性脑损伤患者,可以观察到颅内压(ICP)与 PI(阻力指数)有显著相关性,该研究通过比较创伤性脑损伤患者同一时间 TCD 测得的大脑中动脉(MCA)舒张末期最大血流速度值、PI 值与 ICP 值作比较,发现水肿量越大,ICP 越高,MCA 舒张末期最大血流速度越慢、PI 值越大。另一项研究也表明[22],在颅脑损伤患者中,TCD 测得 MCA 的 PI 值与 ICP 之间存在很强的相关性。在儿童创伤性脑损伤的一项研究中发现,在患儿受伤初期,MCA 的 PI 值在预测颅内压升高方面有良好的灵敏度和特异性,TCD 可以作为一种非侵入性工具,在受伤后的头 24 小时内筛查 ICP 升高[23]。由于 TCD 检查的无创性特点,使得该检查几乎不伴有并发症,同时比起侵入性颅内压监测操作,具有廉价、易操作等优点,但 TCD 对于血流动力学的采集具有强烈的主观性,取决于操作人员对于扫描截面及血流段的选取,

并且不能进行连续监测, 也无法直接辨别水肿脑组织与正常脑组织[13], 所以若要推广 TCD 作为脑水肿的常规监测手段, 可能需要更规范化的操作培训和标准的制定。

3.3. 神经影像学成像技术

CT 和 MRI 是临床常用的脑水肿检查影像学工具, CT 图像上不同组织显示的密度不同, 脑水肿 CT 平扫图像显示为低密度影, 多项针对缺血缺氧性脑损伤的研究也通过计算 CT 扫描图像中灰质与白质衰减比(GWR), 从而评估预测患者的预后等[24][25], 但 CT 对于单纯的细胞毒性脑水肿并不敏感, 这是由于单纯细胞毒性脑水肿并不影响 X 射线衰减, 也不会引起脑组织明显肿胀[13]; 磁共振(MRI)脑水肿征象显示为大脑内 T2 和 FLAIR 信号的变化, 即高信号增加[11], MRI 对水分子有很强的追踪能力, 可以更敏感且更早地发现患者脑组织病理变化[26], 但是 MRI 检查时间长、场地要求高, 所以临床上 CT 常为脑水肿发生时首选检查方法。CT 与 MRI 作为影像学成像检查, 均有一定的滞后性, 并且无法实现对脑水肿的连续监测, 具有一定的局限性[13]。

3.4. 近红外光谱技术

近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)技术是一种可以监测脑氧(rSO₂)及脑血流灌注的无创检测方法[27][28]。NIRS 根据组织检测的光谱信息可以推断出组织的化学成分、含量及分布等, 从而实现组织的区分以及识别[13]。目前国内已有大量关于基于近红外光谱对儿童脑功能的相关研究[29]-[31], 北京大学第一医院儿科的一项针对新生儿缺氧缺血性脑病的研究[32]证实, 基于近红外光谱技术的脑组织氧饱和度, 能客观评价脑组织的氧合状态。Shah 等人[33]一项对 234 名疑似头部受伤的患者研究表明, NIRS 可以有效识别水肿, 并且具有早期检测症状前水肿和颅内出血的潜力。但是 NIRS 监测的灵敏度会随着深度而下降, 大多数仪器对最外层 1~2 cm 的脑组织最敏感, 由此可见, NIRS 对大脑深部结构的信息提供有限[34]。并且人体头颅结构复杂, NIRS 发射的光束需要通过头皮, 颅骨, 硬脑膜等才可以进入皮质, 所以测得的结果受到多重因素的影响, 可能出现的误差较大[35]。所以近红外光谱对于脑水肿的监测还需要更多的探索。

3.5. 生物电阻抗技术

生物电阻抗技术(Biological electrical impedance tomography, BEIT)是近年来兴起的一种无创脑功能监测技术。电阻抗技术(EIT)可以通过测量组织的表面阻抗来计算组织内部导电性, 而生物组织的导电性很大程度上取决于组织的结构, 组织的含水量不同、细胞膜的特性和细胞膜内连接点的破坏都可能影响组织的导电性[36]。此前, EIT 技术已在海外被用于大多数肺通气相关研究[37], Qu 等人[38]介绍了国内首款应用于 ICU 的胸部电阻抗断层扫描设备, 可以用于动态监测床边肺部的通气与灌注。除此之外, EIT 技术还被用于人体传感器设计、植物根和土壤湿度的研究等等各方面[37]。对于脑内病变的研究, 国外一项研究[39]称 EIT 技术和深度电极成像结合可能有利于癫痫发作的定位。脑水肿监测方面, 由于正常脑组织与脑水肿组织之间存在电阻抗差异, 所以 EIT 技术可以用于监测脑水肿并区分不同类型的脑水肿[40], 并且该项研究通过建立大脑水肿的大鼠动物模型, 得出电阻率在缺血缺氧脑损伤后六小时左右达到峰值, 后逐渐下降。国内有一篇研究通过将大脑与脑水含量相关的脑阻抗成像与颅内压力(ICP)进行比较, 得出 EIT 可以监测与脑水肿相关的脑水含量变化, 这可以为早期识别脑水肿和评估甘露醇脱水提供实时和非侵入性成像工具[41]。另有两篇研究表明通过 EIT 可以敏感地反应脑梗死患者的脑水肿, 并且是早期发现脑水肿的可行方法[42][43]。也有研究通过 EIT 技术实时监测患者使用脱水剂后 2 小时的阻抗变化, 发现 EIT 可以作为脑水肿患者实时监测的工具[44]。但临床上使用过程中, 生物电阻抗技术的影响因素众多,

比如测量电极的位置、患者测量时的状态及姿势变化等, 都会对测量结果产生一定的影响[45] [46]。

3.6. 其他检测技术

测量视神经鞘直径(ONSD)技术是一种测量 ICP 的非侵入方法, 可以使用 CT、MRI 和超声波等方法对 ONSD 进行测量, 有多篇成人研究称, 该技术可以作为监测 ICP 改变的替代方法[47] [48]。Tayal 等研究利用超声测量视神经鞘直径与 CT 影像进行比较, 提出超声测量 ONSD 可以直接作为监测脑水肿的有效方法[49], 但该技术与操作者密切相关, 临床尚未普遍开展学习。国外一项针对儿童的研究也证实床旁超声测量 ONSD 是确定头部创伤儿童 ICP 可行且有用的工具[50]。

4. 脑水肿监测在儿童脑损伤疾病中的应用

脑水肿可能是多种儿童脑损伤疾病过程的结果, 并且脑水肿发展迅速, 若不及时治疗, 死亡率极高, 美国一项研究统计了美国住院儿童脑水肿最常见的病因, 分别是脑卒中和缺氧脑损伤, 除此之外中枢神经系统恶性肿瘤疾病及糖尿病酮症酸中毒也是造成脑水肿的主要病因[51]。

4.1. 缺血缺氧性脑水肿

缺血缺氧性脑病是儿童脑水肿形成的重要病因之一, 比较常见的有新生儿缺血缺氧性脑病和非新生儿缺血缺氧性脑病, 后者多为呼吸心跳骤停后发生。缺血缺氧性脑病的损伤是动态变化过程, 最初是由于缺氧缺血损伤发生后立即发生一系列厌氧代谢, 此时细胞毒性水肿增加, 随着时间发展, 血脑屏障被破坏, 血管源性脑水肿进一步出现[52]。在两项关于溺水导致缺氧脑损伤的儿科研究中, ICP 的监测可以预测患者的死亡率[53] [54]。国外有研究提到, 可以通过检测患者 CT 图像基底神经节(GWR-BG)区域的灰白质比对呼吸心跳骤停后脑水肿进行量化分析[24]。一项 2020 年的荟萃分析表明, 脑 CT 的基底神经节(GWR-BG)区域的灰白质比, 可以作为评估呼吸心跳骤停后神经学变化的有用且重要的参数[55]。但在临床实践中, 对于发生缺血缺氧性脑病患儿(如机械性窒息、溺水等), 发病后多数需要直接入住 PICU 进行重症监护及气管插管等一系列治疗措施, 该类型患儿往往无法立即完善头颅影像学检查。在一项对心脏骤停、溺水和窒息后儿童的回溯性队列研究中, 经颅多普勒超声(TCD)所测得的血流速度及搏动指数可以作为指导心肺复苏后治疗的指导依据, 也可以对预后有一定的预测[56]。但在临床工作中, TCD 的完善具有主观性, 与操作者的经验密切相关, 且该项技术在临床医生群体中掌握率仍有待提升。无创脑水肿监测是一种基于生物电阻抗技术的非侵入性脑水肿监测技术, 是通过扰动系数对脑水肿的变化做出直接反映。国内一篇文章通过对兔子进行一系列成像监测实验, 证实电阻抗技术可以作为缺血缺氧性脑中风识别的一种快速而敏感的方法[57]。

4.2. 感染性脑水肿

病毒性脑炎是由各种病毒引起的中枢神经系统感染性疾病, 它是病毒透过血脑屏障进入神经系统, 从而引起脑部炎症的一种疾病[58]。常出现脑水肿、颅内压增高等并发症, 危及患儿的生命[59]。病毒性脑炎最主要的病例改变为病灶部位水肿及脑组织结构异常, CT 图像上病灶一般呈片状或斑点状低密度影, 但 CT 图像上病灶界限一般显示不清, 并且不容易与脑梗死等疾病区分开来。MRI 对脑软组织的密度变化比较敏感, 国外有研究表明, MRI 的 DWI 序列对于检测早期病毒性脑炎和描述病灶范围方面, 优于其他常规 MRI 序列[60]。一项基于电阻抗技术的无创脑水肿动态监测仪在乙型病毒性脑炎患儿治疗过程中的监测分析[61], 证实无创脑水肿监测可以在脑炎发病机制研究、脱水剂选择和疗效判断具有推广价值。

5. 小结与展望

各种儿童常见神经内科疾病均有可能导致脑水肿的发生, 脑水肿的发生通常会导致颅内压升高, 但在水肿早期或轻微水肿时由于脑组织自身调节能力, 颅内压并不一定会升高[13], 并且近年来国内外神经内外科相关研究结果表明: 细胞毒性脑水肿的主要危害在于细胞损伤、坏死和脑功能障碍[62]。就单独的细胞毒性脑水肿而言, 是细胞外液积聚到细胞内的过程, 血脑屏障未被破坏, 所以脑组织总体积并未增加, 并不会造成颅内压升高[8]。综上所述, 单凭检测颅内压升高来监测脑水肿是不全面的[13], 但儿童窒息、心肺复苏后及病毒性脑炎等可能造成早期细胞毒性脑水肿的神经系统疾病并不少见, 并且脑水肿发展迅速, 并且通常导致患儿死亡或预后较差的结局, 所以早期识别脑水肿发生及种类, 并及时监测脑水肿发展显得尤为重要。目前脑水肿监测技术发展迅速, 但真正大规模应用于临床的方法并不多, 很多方法仅仅是建立于动物实验模型, 并未在临床加以验证, 发生脑水肿患儿多数需在重症病房监护, 很多患儿甚至需要有创呼吸机维持生命体征, 所以当前研究的重点应该为寻找一个可以普及的监测方法或装置, 该方法应具有可床旁操作、无创、准确、安全等特征。

参考文献

- [1] Cook, A.M., Morgan Jones, G., Hawryluk, G.W.J., Mailloux, P., McLaughlin, D., Papangelou, A., *et al.* (2020) Guidelines for the Acute Treatment of Cerebral Edema in Neurocritical Care Patients. *Neurocritical Care*, **32**, 647-666. <https://doi.org/10.1007/s12028-020-00959-7>
- [2] 符跃强, 许峰. 儿童颅内压监测研究进展[J]. 中国小儿急救医学, 2017, 24(6): 412-419.
- [3] 封菲, 丁美萍. 创伤性脑水肿的发生机制及研究进展[J]. 心脑血管病防治, 2013, 13(6): 472-474.
- [4] 赵建华, 索爱琴. 缺血性脑水肿的发病机制及研究进展[C]//河南省医学会, 国际继续教育组织. 2006 中国(郑州)国际临床神经病学学术研讨会资料汇编. 2006: 298-302.
- [5] Habgood, M.D., Bye, N., Dziegielewska, K.M., Ek, C.J., Lane, M.A., Potter, A., *et al.* (2007) Changes in Blood-Brain Barrier Permeability to Large and Small Molecules Following Traumatic Brain Injury in Mice. *European Journal of Neuroscience*, **25**, 231-238. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05275.x>
- [6] Hudak, A.M., Peng, L., Marquez de la Plata, C., Thottakara, J., Moore, C., Harper, C., *et al.* (2014) Cytotoxic and Vasogenic Cerebral Oedema in Traumatic Brain Injury: Assessment with FLAIR and DWI Imaging. *Brain Injury*, **28**, 1602-1609. <https://doi.org/10.3109/02699052.2014.936039>
- [7] Winkler, E.A., Minter, D., Yue, J.K. and Manley, G.T. (2016) Cerebral Edema in Traumatic Brain Injury: Pathophysiology and Prospective Therapeutic Targets. *Neurosurgery Clinics of North America*, **27**, 473-488. <https://doi.org/10.1016/j.nec.2016.05.008>
- [8] 宋佳丽. 早期脑水肿形成及发展过程中电阻抗变化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 第四军医大学, 2017.
- [9] Raslan, A. and Bhardwaj, A. (2007) Medical Management of Cerebral Edema. *Neurosurgical Focus*, **22**, 1-12. <https://doi.org/10.3171/foc.2007.22.5.13>
- [10] Gao, C.P. and Ang, B.T. (2008) Biomechanical Modeling of Decompressive Craniectomy in Traumatic Brain Injury. In: Steiger, H.J., Ed., *Acta Neurochirurgica Supplementum*, Springer, 279-282. https://doi.org/10.1007/978-3-211-85578-2_52
- [11] Nehring, S.M., Tadi, P. and Tenny, S. (2024) Cerebral Edema. StatPearls.
- [12] Obenaus, A. and Badaut, J. (2021) Role of the Non-invasive Imaging Techniques in Monitoring and Understanding the Evolution of Brain Edema. *Journal of Neuroscience Research*, **100**, 1191-1200. <https://doi.org/10.1002/jnr.24837>
- [13] 雷盼, 蔡强, 宋平, 等. 脑水肿与颅内压监测的发展与应用[J]. 中国医药, 2022, 17(8): 1264-1267.
- [14] Padayachy, L.C., Figaji, A.A. and Bullock, M.R. (2009) Intracranial Pressure Monitoring for Traumatic Brain Injury in the Modern Era. *Child's Nervous System*, **26**, 441-452. <https://doi.org/10.1007/s00381-009-1034-0>
- [15] Le Roux, P., Menon, D.K., Citerio, G., *et al.* (2014) Consensus Summary Statement of the International Multidisciplinary Consensus Conference on Multimodality Monitoring in Neurocritical Care: A Statement for Healthcare Professionals from the Neurocritical Care Society and the European Society of Intensive Care Medicine. *Neurocritical Care*, **21**, S1-S26.
- [16] Smith, M. (2008) Monitoring Intracranial Pressure in Traumatic Brain Injury. *Anesthesia & Analgesia*, **106**, 240-248.

- <https://doi.org/10.1213/01.ane.0000297296.52006.8e>
- [17] Miller, C. and Guillaume, D. (2015) Incidence of Hemorrhage in the Pediatric Population with Placement and Removal of External Ventricular Drains. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, **16**, 662-667. <https://doi.org/10.3171/2015.5.peds1563>
 - [18] Lang, J., Beck, J., Zimmermann, M., Seifert, V. and Raabe, A. (2003) Clinical Evaluation of Intraparenchymal Spiegelberg Pressure Sensor. *Neurosurgery*, **52**, 1455-1459. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000065136.70455.6f>
 - [19] Evensen, K.B. and Eide, P.K. (2020) Measuring Intracranial Pressure by Invasive, Less Invasive or Non-Invasive Means: Limitations and Avenues for Improvement. *Fluids and Barriers of the CNS*, **17**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1186/s12987-020-00195-3>
 - [20] Czosnyka, M. (2004) Monitoring and Interpretation of Intracranial Pressure. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **75**, 813-821. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2003.033126>
 - [21] Aaslid, R., Markwalder, T. and Nornes, H. (1982) Noninvasive Transcranial Doppler Ultrasound Recording of Flow Velocity in Basal Cerebral Arteries. *Journal of Neurosurgery*, **57**, 769-774. <https://doi.org/10.3171/jns.1982.57.6.0769>
 - [22] Bellner, J., Romner, B., Reinstrup, P., Kristiansson, K., Ryding, E. and Brandt, L. (2004) Transcranial Doppler Sonography Pulsatility Index (PI) Reflects Intracranial Pressure (ICP). *Surgical Neurology*, **62**, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.surneu.2003.12.007>
 - [23] O'Brien, N.F., Maa, T. and Reuter-Rice, K. (2015) Noninvasive Screening for Intracranial Hypertension in Children with Acute, Severe Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, **16**, 420-425. <https://doi.org/10.3171/2015.3.peds14521>
 - [24] Zhou, F., Wang, H., Jian, M., Wang, Z., He, Y., Duan, H., et al. (2022) Gray-White Matter Ratio at the Level of the Basal Ganglia as a Predictor of Neurologic Outcomes in Cardiac Arrest Survivors: A Literature Review. *Frontiers in Medicine*, **9**, Article 847089. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.847089>
 - [25] Esdaille, C.J., Coppler, P.J., Faro, J.W., Weisner, Z.M., Condlie, J.P., Elmer, J., et al. (2020) Duration and Clinical Features of Cardiac Arrest Predict Early Severe Cerebral Edema. *Resuscitation*, **153**, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2020.05.049>
 - [26] Krieger, D.A. and Dehkharghani, S. (2015) Magnetic Resonance Imaging in Ischemic Stroke and Cerebral Venous Thrombosis. *Topics in Magnetic Resonance Imaging*, **24**, 331-352. <https://doi.org/10.1097/rmr.0000000000000067>
 - [27] Jöbsis, F.F. (1977) Non-Invasive, Infra-Red Monitoring of Cerebral O₂ Sufficiency, Blood Volume, HbO₂-Hb Shifts and Blood-Flow. *Acta Neurologica Scandinavica*, **64**, 452-453.
 - [28] Huppert, T.J., Hoge, R.D., Diamond, S.G., Franceschini, M.A. and Boas, D.A. (2006) A Temporal Comparison of BOLD, ASL, and NIRS Hemodynamic Responses to Motor Stimuli in Adult Humans. *NeuroImage*, **29**, 368-382. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.065>
 - [29] 张林, 张建平, 江才明, 等. 基于功能性近红外光谱的学龄前孤独症谱系障碍儿童脑功能特征研究[J/OL]. 中国儿童保健杂志, 2025: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1346.R.20250115.1132.002.html>, 2025-03-11.
 - [30] 牛雅楠, 陈宇, 薛芙蓉, 等. 功能性近红外光谱技术应用于孤独症领域的知识图谱可视化分析[J]. 神经损伤与功能重建, 2024: 1-6. <https://doi.org/10.16780/j.cnki.sjssgncj.20240545>, 2025-03-11.
 - [31] 熊桃, 李阳, 崔丽君, 等. 功能性近红外光谱应用于脑认知领域的可视化分析[J]. 中国康复, 2024, 39(1): 46-51.
 - [32] 侯新琳, 周丛乐, 黄岚, 等. 近红外光谱技术对新生儿缺氧缺血性脑病脑氧合及组织灌注的评价探讨[J]. 中国儿童保健杂志, 2006(1): 8-10.
 - [33] Shah, J., Solanki, S., Adhvaryu, N.S., Patel, D.G., Solanki, P.K. and Sanghavi, H.P. (2023) Advancing Edema Detection: Harnessing the Power of Machine Learning and near Infrared Spectroscopy for Cerebral and Cerebellar Edema Assessment. *Journal of Clinical Neuroscience*, **116**, 50-54. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2023.08.018>
 - [34] Strangman, G.E., Li, Z. and Zhang, Q. (2013) Depth Sensitivity and Source-Detector Separations for Near Infrared Spectroscopy Based on the Colin27 Brain Template. *PLOS ONE*, **8**, e66319. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066319>
 - [35] Ostojic, D., Jiang, J., Isler, H., Kleiser, S., Karen, T., Wolf, M., et al. (2020) Impact of Skull Thickness on Cerebral NIRS Oximetry in Neonates: An *in Silico* Study. In: Ryu, P.D., LaManna, J., Harrison, D. and Lee, S.S., Eds., *Oxygen Transport to Tissue XLI*, Springer, 33-38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_5
 - [36] Mirhoseini, M., Rezanejad Gatabi, Z., Das, S., Joveini, S. and Rezanezhad Gatabi, I. (2022) Applications of Electrical Impedance Tomography in Neurology. *Basic and Clinical Neuroscience Journal*, **13**, 595-608. <https://doi.org/10.32598/bcn.2021.3087.1>
 - [37] Li, Y., Wang, N., Fan, L., Zhao, P., Li, J., Huang, L., et al. (2023) Robust Electrical Impedance Tomography for Biological Application: A Mini Review. *Heliyon*, **9**, e15195. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15195>

- [38] Qu, S., Dai, M., Wu, S., Lv, Z., Ti, X. and Fu, F. (2021) System Introduction and Evaluation of the First Chinese Chest EIT Device for ICU Applications. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 19273. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98793-0>
- [39] Witkowska-Wrobel, A., Aristovich, K., Faulkner, M., Avery, J. and Holder, D. (2018) Feasibility of Imaging Epileptic Seizure Onset with EIT and Depth Electrodes. *NeuroImage*, **173**, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.02.056>
- [40] Song, J., Chen, R., Yang, L., Zhang, G., Li, W., Zhao, Z., et al. (2018) Electrical Impedance Changes at Different Phases of Cerebral Edema in Rats with Ischemic Brain Injury. *BioMed Research International*, **2018**, Article ID: 9765174. <https://doi.org/10.1155/2018/9765174>
- [41] Yang, B., Li, B., Xu, C., Hu, S., Dai, M., Xia, J., et al. (2019) Comparison of Electrical Impedance Tomography and Intracranial Pressure during Dehydration Treatment of Cerebral Edema. *NeuroImage: Clinical*, **23**, Article ID: 101909. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.101909>
- [42] He, L.Y., Wang, J., Luo, Y., Dong, W.W. and Liu, L.X. (2010) Application of Non-Invasive Cerebral Electrical Impedance Measurement on Brain Edema in Patients with Cerebral Infarction. *Neurological Research*, **32**, 770-774. <https://doi.org/10.1179/016164109x12478302362572>
- [43] Lou, J.H., Wang, J., Liu, L.X., He, L.Y., Yang, H. and Dong, W.W. (2012) Measurement of Brain Edema by Noninvasive Cerebral Electrical Impedance in Patients with Massive Hemispheric Cerebral Infarction. *European Neurology*, **68**, 350-357. <https://doi.org/10.1159/000342030>
- [44] Fu, F., Li, B., Dai, M., Hu, S., Li, X., Xu, C., et al. (2014) Use of Electrical Impedance Tomography to Monitor Regional Cerebral Edema during Clinical Dehydration Treatment. *PLOS ONE*, **9**, e113202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113202>
- [45] Lyons-Reid, J., Ward, L.C., Kenealy, T. and Cutfield, W. (2020) Bioelectrical Impedance Analysis—An Easy Tool for Quantifying Body Composition in Infancy? *Nutrients*, **12**, Article 920. <https://doi.org/10.3390/nu12040920>
- [46] 王倩, 许欢, 周广敏, 等. 生物阻抗测量技术及其临床应用研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2014, 33(2): 185-190.
- [47] Geeraerts, T., Merceron, S., Benhamou, D., Vigué, B. and Duranteau, J. (2008) Non-Invasive Assessment of Intracranial Pressure Using Ocular Sonography in Neurocritical Care Patients. *Intensive Care Medicine*, **34**, 2062-2067. <https://doi.org/10.1007/s00134-008-1149-x>
- [48] Kimberly, H. and Noble, V.E. (2008) Using MRI of the Optic Nerve Sheath to Detect Elevated Intracranial Pressure. *Critical Care*, **12**, Article No. 181. <https://doi.org/10.1186/cc7008>
- [49] Tayal, V.S., Neulander, M., Norton, H.J., Foster, T., Saunders, T. and Blaivas, M. (2007) Emergency Department Sonographic Measurement of Optic Nerve Sheath Diameter to Detect Findings of Increased Intracranial Pressure in Adult Head Injury Patients. *Annals of Emergency Medicine*, **49**, 508-514. <https://doi.org/10.1016/j.annemergmed.2006.06.040>
- [50] Şık, N., Ulusoy, E., Çitlenbik, H., Öztürk, A., Er, A., Yılmaz, D., et al. (2022) The Role of Sonographic Optic Nerve Sheath Diameter Measurements in Pediatric Head Trauma. *Journal of Ultrasound*, **25**, 957-963. <https://doi.org/10.1007/s40477-022-00676-1>
- [51] Laor, L., Sendi, P., Martinez, P. and Totapally, B.R. (2023) Epidemiology and Outcomes of Cerebral Edema in Hospitalized Children. *Pediatric Neurology*, **147**, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2023.07.020>
- [52] Arulnathan, E., Manchanda, A., Dixit, R. and Kumar, A. (2023) Temporal Evolution of Signal Alterations in the Deep Gray Nuclei in Term Neonates with Hypoxic-Ischemic Brain Injury: A Comprehensive Review. *Journal of Child Neurology*, **38**, 550-556. <https://doi.org/10.1177/08830738231188561>
- [53] Dean, M.J. and McComb, G.J. (1981) Intracranial Pressure Monitoring in Severe Pediatric Near-Drowning. *Neurosurgery*, **9**, 627-630. <https://doi.org/10.1227/00006123-198112000-00003>
- [54] Nussbaum, E. and Galant, S.P. (1983) Intracranial Pressure Monitoring as a Guide to Prognosis in the Nearly Drowned, Severely Comatose Child. *The Journal of Pediatrics*, **102**, 215-218. [https://doi.org/10.1016/s0022-3476\(83\)80523-x](https://doi.org/10.1016/s0022-3476(83)80523-x)
- [55] Wang, W.J., Cui, J., Lv, G.W., Feng, S.Y., Zhao, Y., Zhang, S.L., et al. (2020) Prognostic Values of the Gray-to-White Matter Ratio on Brain Computed Tomography Images for Neurological Outcomes after Cardiac Arrest: A Meta-Analysis. *BioMed Research International*, **2020**, Article ID: 7949516. <https://doi.org/10.1155/2020/7949516>
- [56] Lin, J., Hsia, S., Wang, H., Chiang, M. and Lin, K. (2015) Transcranial Doppler Ultrasound in Therapeutic Hypothermia for Children after Resuscitation. *Resuscitation*, **89**, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2015.01.029>
- [57] Shi, X.T., You, F.S., Fu, F., Liu, R.G., You, Y., Dai, M., et al. (2008) Preliminary Research on Monitoring of Cerebral Ischemia Using Electrical Impedance Tomography Technique. 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vancouver, 20-25 August 2008, 1188-1191. <https://doi.org/10.1109/TEMBS.2008.4649375>

-
- [58] 王彩云, 张晔. 小儿病毒性脑炎的 MRI 影像诊断和鉴别诊断研究[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(9): 124-126.
- [59] 齐旭升, 王素梅. 小儿病毒性脑炎致多脏器衰竭 45 例临床分析[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2015, 18(23): 125-126.
- [60] Kiroğlu, Y., Calli, C., Yuntun, N., Kitis, O., Kocaman, A., Karabulut, N., *et al.* (2006) Diffusion-Weighted MR Imaging of Viral Encephalitis. *Neuroradiology*, **48**, 875-880. <https://doi.org/10.1007/s00234-006-0143-7>
- [61] 龚放, 彭明清, 王世伟, 等. 无创脑水肿动态监测仪在乙型病毒性脑炎患儿治疗过程中的监测分析[J]. 重庆医学, 2013, 42(13): 1462-1465.
- [62] Donkin, J.J. and Vink, R. (2010) Mechanisms of Cerebral Edema in Traumatic Brain Injury: Therapeutic Developments. *Current Opinion in Neurology*, **23**, 293-299. <https://doi.org/10.1097/wco.0b013e328337f451>