

颅内压监测仪在神经重症中的应用及进展

孙震¹, 缪星宇^{2*}

¹西安医学院, 陕西 西安

²陕西省人民医院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年2月21日; 录用日期: 2022年3月13日; 发布日期: 2022年3月22日

摘要

颅内压监测和指导下的治疗仍然是当代神经危重症治疗的基石, 但临床应用中仍存在许多问题。颅内压监测从简单的测压到可连续反应病人颅内压(intracranial pressure, ICP)、脑灌注压(cerebral perfusion pressure, CPP)、平均动脉压(mean arterial pressure, MAP)、压力反应指数(pressure response index, PRx)等的变化, 从孤立数值转变为ICP与脑代谢、脑温等神经功能的多模态监测研究, 利用计算机实时数据处理得出最优灌注压, 为及时调整治疗方案、保持良好脑灌注及脑代谢提供可靠依据, 精准治疗神经外科疾病。本文现围绕ICP监测现状及相关脑代谢方面在神经重症中的临床应用及研究进展展开综述。

关键词

颅内压监测, 脑代谢, 神经重症, 微透析, 脑温度

Application and Progress of Intracranial Pressure Monitor in Severe Neuropathy

Zhen Sun¹, Xingyu Miao^{2*}

¹Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 21st, 2022; accepted: Mar. 13th, 2022; published: Mar. 22nd, 2022

Abstract

Intracranial pressure (ICP) monitoring and treatment under the guidance of ICP are still the cornerstone of contemporary neurological critical treatment, but there are still many problems in

*通讯作者。

clinical application. Intracranial pressure monitoring changed from simple pressure measurement to continuous response to the changes of ICP, CPP, MAP and PRx in patients, and from isolated values to multimodal monitoring of ICP and brain metabolism, brain temperature and other neurological functions. The optimal perfusion pressure was obtained by computer real-time data processing, which provides a reliable basis for timely adjustment of treatment plan, maintenance of good cerebral perfusion and brain metabolism, and accurate treatment of neurosurgical diseases. This article reviews the current situation of ICP monitoring and the clinical application and research progress of related brain metabolism in neurological severe diseases.

Keywords

Intracranial Pressure Monitoring, Brain Metabolism, Neurological Critical Disease, Microdialysis, Brain Temperature

Copyright © 2022 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. 前言

颅内压监测已成为神经危重监护的基石。在患有神经外科疾病的患者中, 预防继发性脑损伤是重中之重。因此, 有必要对患者进行密切 ICP 监测, 以便在早期阶段发现神经状况的进一步恶化。经监测的目的是准确反映颅内压的真实情况, 在早期发现高颅压对脑灌注和脑血流、脑代谢的病理生理变化, 一旦提示颅内压变化, 临床可及时采取应对措施, 以减少颅内压增高导致继发性颅脑损伤发生几率[1]。昏迷患者可采用有创临床神经监测方法, 植入测量探头(用于测定颅内压、脑氧分压、脑温度和脑代谢) [2]。神经监测的适应症是脑缺血、脑出血和颅脑损伤等[3]。其中颅内压监测是基础也是核心, 大量研究表明 ICP 监测在疾病的整个治疗和手术过程中有重大的指导意义。脑室内 ICP 监测作为颅内压监测的“金标准”, 对于观察患者颅内压变化、脑温度及改善预后情况具有重要意义, 能及时发现患者颅内压及脑温的变化而选择最佳手术治疗时机, 从而避免通过临床症状和体征观察及 CT 结果判断而导致的手术时机延误。在颅内压变化之前, 颅内的很多指标都已经发生了变化, 最终的核心是导致了颅内压力的变化, 一旦出现了颅内压力的变化, 实际上是出现了一系列反应中的终末反应, 我们需要在颅内压变化之前发现它并终止它。脑代谢监测可以弥补常规 ICP 监测技术中的不足, 更早地发现大脑的病理生理变化, 不仅能够更准确判断患者的病情变化以及制定科学的治疗方案, 而且能够有效改善预后, 降低住院时间, 减少住院费用, 降低并发症发生率。多种神经监测技术联合应用, 进一步整合脑生理数据, 能够更真实地反映机体的病态反应, 对认识疾病的本质将会越来越重要。本文就 ICP 监测和脑代谢监测在临床应用中现存的优点和不足展开综述, 以帮助临床医生更好地了解 ICP 监测和脑代谢监测的临床意义, 更加规范, 更精确地指导临床治疗工作。现综述如下。

2. ICP 监测

2.1. ICP 监测的适应症

创伤性脑损伤(TBI)是世界范围内发病率和死亡率高的主要原因。BTF 指南建议, 当 TBI 患者的 ICP 阈值高于 20 mmHg 时应开始降低 ICP 治疗[4];若 ICP 控制不佳即可能导致颅内大脑结构的扭曲和移位(突出)。脑组织向下向脊髓突出特别危险, 可能损害脑干, 导致意识丧失、甚至死亡[5]。因此, 颅内压监测

在疾病的诊断、治疗和预测预后方面均具有重要的价值。那么哪类患者需要 ICP 监测呢?《颅脑损伤治疗指南》[6]指出: 1) ① 所有颅脑损伤评分(GCS3-8)且 CT 扫描异常的可挽救的患者均应监测颅内压; 其中 CT 扫描异常包括血肿、脑挫伤、严重脑肿胀、突出或基底池受压。② 如果 CT 扫描正常但患者入院时有以下两个或两个以上特征: 单侧或双侧肢体运动障碍、年龄 > 40 岁或收缩压 < 90 mmHg, 亦建议进行 ICP 监测。2) 同时需排除发病 24 小时内有严重颅外损伤、颅骨切除术或死亡的患者。因为颅脑损伤患者的死亡和残疾是原发损伤的结果, 也是创伤性肿块、血肿增加和脑水肿或肿胀引起的颅内压升高所致的继发性损伤的结果。

在 TBI 的管理中引起关注的另一个参数是脑灌注压(CPP), 为了避免继发性脑损伤, 除了 ICP 值的绝对值之外, 充足的脑血液循环也是必要的[7]。根据颅脑损伤患者的 ICP 数据, 医生可以计算 CPP 并评估颅内病理是否发生恶化以及恶化的程度以指导治疗[8]。因此, CPP 被引入作为临床上连续的参数。这是根据平均动脉压(MAP)和颅内压(ICP)之间的差值计算出来的($CPP = MAP - ICP$), 根据脑创伤基金会目前的指南, CPP 在 60~70 mmHg 之间时, TBI 患者的存活率更高、预后更好[9]。

2.2. ICP 监测的分类

ICP 监测分为侵入性和非侵入性的。虽然侵入性的颅内压监测方法比非侵入性的准确, 也是迄今为止在急性情况下测量颅内压的最好方法[10]。但其也存在感染、出血、疼痛、不适等风险, 并不适合持续的长期监测[11]; 掌握神经外科专业知识和经验、坚持无菌技术和预防性使用抗生素可将这些风险降至最低[12]。

而非侵入性 ICP 监测通常用于不能立即使用侵入性方法或存在严重并发症(出血, 感染)危险的患者中。随着应用抗血小板聚集和抗凝药物来预防肺栓塞的住院患者比例的增加, 这些无创技术可能具有更广泛的适用性, 尤其在危重病人的治疗中[13] [14]。Vinayak Narayan [15]等发现经颅多普勒(TCD)和视神经鞘直径(ONSD)这两种无创 ICP 监测方法在预测早期高颅压方面可能相对优于其他无创性检查, TCD 和 ONSD 由于其特定的测量参数特性, 可以提供间接、可靠的 ICP 值。在实际应用中, TCD 可用于早期识别重型颅脑损伤后 ICP 升高和 CPP 降低的患者。此外, 该方法还提供了检测重型颅脑损伤后血管痉挛的额外优势[16]。ONSD 超声在测量颅内压力时, 如果脑脊液压力增加, 视神经鞘就会增大。视神经鞘直径测量这项技术不能用于面部创伤或其它可能影响 ONSD 的患者(例如格雷夫病、结节病) [17] [18]。此外, 也有一些研究表明, 当颅内压有剧烈波动时, ONSD 的特异性会减弱[19]。目前还没有任何一种无创 ICP 监测方法可以代替侵入性的金标准。侵入性脑室内监测方法仍是目前监测颅内压的“金标准” [20]。

基于无创性耳蜗微音器电位(CM)的颅内压监测可能有助于早期处理意识正常的脑损伤患者, 并有助于神经疾病的诊断。除了主要用于没有侵入性监测可能性的科室筛查外, CM 还可以作为一种门诊工具, 在通过侵入性 ICP 测量进行初步校准后, 用于长期存在 ICP 问题的患者。CM 方法的便携性和成本效益, 可供急救车辆或患者家中的护理人员使用, 这使得它很有希望用于目前无法从有创 ICP 监测中受益的患者[21]。Jonathan M. Matthews 提出了一种实时实现的 Kashif 算法, 用于连续、无创地估计颅内压, 这些贡献朝着在各种临床环境中在患者床边进行实时非侵入性 ICP 评估的目标迈出了明确的一步[22]。

2.3. ICP 监测的价值

虽然基于颅内压的治疗有上述诸多临床益处, 但与单纯基于患者的神经学检查、影像表现和临床医生的敏锐度的治疗相比, 监测颅内压是否能提供临床益处尚未达成共识。虽然有研究表明, 监测 ICP 不仅无益, 而且实际上可能导致更差的结果[23] [24]。但也有一些研究表明, 监测 ICP 与提高存活率相关, ICP 监测使存活率下降可能与降低颅内压的治疗方法相关, 过度换气已被证明会降低脑灌注并导致脑缺

血, 甘露醇的渗透性利尿可能会导致低血容量并导致低血压发作, 血管升压剂的不当使用、麻痹剂和镇静剂的过度使用, 和延迟脱离呼吸机, 所有这些都可能导致死亡率增加[25] [26] [27]。

3. 脑含氧量的监测

无创脑代谢监测主要通过近红外光谱仪(near-infrared spectroscopy, NIRS)实现。近红外光谱法是一种非侵入性技术, 用于评估大脑的氧合、脑血流动力学和 ICP。除了测量脑血氧饱和度之外, 还可以使用 HbO 和 Hb 的测量值得出其他参数, 例如组织氧分数提取(FTOE)和脑血容量(CBV)。因此, 近红外光谱为脑氧输送和利用之间的平衡提供了一种持续的临床测量方法[28] [29]。多年前 Kampfl 等[30]对 8 例头颅外伤患者进行 NIRS 检查, 发现颅内压(>25 mmHg)者 rSO₂ (局部脑氧合程度)显著降低, 其他的相关指标和正常组均相同。提示颅内压显著升高后 CPP 降低, 引起 rSO₂ 减低, NIRS 可用于无创颅内压监测。

脑静脉血氧饱和度(ScvO₂)的测量被认为是评估第一阶段姑息治疗(S1P)后组织氧输送(DO₂)充分性的金标准, 基于 NIRS 的局部氧合指数(rSO₂)经常被用来筛查 DO₂ 受损。Erin Rescoe [31]等人回顾性研究了接受单心室姑息治疗的 84 名左心发育不良综合征患者, ScvO₂ < 30%通常代表 DO₂ 严重受损。在术后早期维持 ScvO₂ > 50%与提高存活率有关, 因此, 准确评估 S1P 后 ScvO₂ 对于这些患者的术后管理至关重要。

过度通气患者 PaCO₂ 水平会有明显改变, 因此在 NIRS 传感器所监测的组织脉管系统中, 脑静脉血与动脉血的体积比会发生生理性的变化。由于 CO₂ 对脑血管有较明显的舒张作用, 因此血液中 PaCO₂ 的水平可以改变 V:A 的比率, 其中高 PaCO₂ 水平将驱动动脉血容量比大于 30%, 而低 PaCO₂ 水平将驱动动脉血容量比应小于 30%。由于低碳酸血症导致脑动脉血管收缩, 导致血流减少, 因此可导致脑组织缺血。在这种情况下, NIRS 传感器会检测到动脉血量相对于静脉血量的增加, 从而导致组织血氧饱和度(StO₂)的增加[32] [33]。

临床上还有一种间接测量脑的氧代谢的方法, 颈静脉血气分析可用于评估脑组织氧消耗情况, 它反映了全脑氧供应与消耗之间的动态平衡, 是一项评估全脑血流量和脑氧代谢之间是否相匹配的有效指标。Ass 等[34]认为脑出血的患者中, 要控制升高的 ICP 以维持正常的 CPP, 以减少脑疝发生率。颈静脉血气分析主要临床价值有: ① 通过颈静脉血气分析中的颈静脉球部血氧饱和度(SjvO₂)监测可以早期判断脑组织是否缺血缺氧。患者治疗过程中不恰当的使用甘露醇、过度通气等降颅压方法可能并不增加脑供氧量, 反而导致脑缺血、缺血[35]。② 通过监测颈静脉血气分析及时采取相关措施, 避免加重脑缺血缺氧。监测颈静脉血气分析, 当颈静脉球部血氧饱和度(SjvO₂)、颈静脉氧分压(PjvO₂)降低时可给予高压氧疗; 病情危重、生命体征变化不稳定的患者可给予呼吸机高浓度氧疗, 甚至可以使用呼吸机高浓度吸氧联合 PEEP 来改善患者的低氧血症, 从而改善患者动脉、颈静脉球部血氧水平, 进而改善患者脑氧代谢[36]。国外相关研究认为 SjvO₂ 正常值约为 60%, SjvO₂ 持续<50%或>75%均提示患者预后不良, 颈静脉球部血氧饱和度结合脑氧摄取(CEO₂)、动静脉氧含量差(AVDO₂)的变化分析, 可以间接反映脑出血患者脑组织血流及氧代谢功能情况, 反映病情, 评估预后[37]。但 SjvO₂ 监测仅间歇性监测从大脑返回的静脉血氧浓度, 间接提示大脑对氧的利用程度[38]。

4. 脑代谢的监测

脑微透析技术(cerebral microdialysis, CMD)是一种连续监测脑代谢的方法, 可通过血脑屏障提供脑部亚细胞水平的能量代谢情况。CMD 还可为临床研究提供特殊信息, 如确定药物是否透过血脑屏障、检测下游靶点及生物标志物。CMD 是通过植入脑实质的精细微透析导管进行的, 可以常规测定以下代谢物[39]: 谷氨酸、丙酮酸、乳酸、甘油、葡萄糖。甘油和谷氨酸水平升高可能意味着细胞损伤增加。在缺血

的情况下, 丙酮酸和乳酸增加, 大脑通过无氧代谢以获得能量。而脑间质中葡萄糖的浓度在很大程度上依赖于血浆中的葡萄糖浓度, 故 CMD 血糖值正常并不排除缺血。所以需对 CMD 参数进行整体评估才会使结果更加准确[40]。

脑出血最常见的并发症是颅内血肿扩大、脑脊液循环通路阻塞或脑水肿。颅内压升高与延迟性神经恶化、脑灌注改变和兴奋性毒性介质水平升高[41]。脑灌注压决定脑血流, 因此 ICP 升高或 MAP 降低都可能导致脑缺血。几项使用 $S_{jv}O_2$ 和监测脑组织中脑氧合指数($P_{bti}O_2$)的研究表明, 在生理性 ICP 和 CPP 值下, 也有可能发生脑缺血[42]。在脑出血患者中使用微透析测量的脑组织中乳酸盐/丙酮酸盐比率(L/P)的升高与 CPP 的变化没有相关性, 这一事实可能解释了基于纠正 CPP 的治疗在这类患者中并不总是有效的。

脑细胞和血管对蛛网膜下腔的血液及其分解产物发生反应, 继而导致颅内高压和脑低灌注的结果。在这种情况下, 脑细胞的能量代谢受到威胁[43]。蛛网膜下腔出血后, 血管收缩导致局部灌注减少, 导致缺氧和缺血。在 ICP 甚至 $P_{bti}O_2$ 不变的情况下, L/P 比值升高的另一个原因是氧利用障碍。原因可能是线粒体功能障碍(高 L/P 比, $P_{bti}O_2$ 不变) [44]。SAH 伴意识障碍患者的神经监测标准是颅内压监测, 这类患者有各种并发症的风险, 如: 蛛网膜下腔出血再出血、脑水肿、血管痉挛等。在 L/P 比值升高的患者中, 只有四分之一的患者颅内压升高, 这一事实表明, 在这一组患者中, 多模式监测是必要的。仅靠颅内压监测不足以及早发现潜在的能量衰竭(缺氧、线粒体功能障碍等)。颅内压值与代谢应激的主要指标(L/P)之间的关系可能有助于更好地了解 SAH 后的一系列临床表现, 也有助于对 SAH 现有的神经监测方法进行批判性评估。微透析和脑能量代谢产物的分析可以早期发现 SAH 后由于一系列过程引起的潜在继发性脑损伤。这使得即使在没有颅内压升高的情况下也能检测到神经元的氧化还原反应[45]。

压力自动调节是在不同的 CPP 上保持足够的, 不变的脑血流量(CBF)的能力。压力自动调节可连续测量为压力反应性指数(PR_x), 即 MAP 和 ICP 变化之间的相关系数。PR_x 负值表示压力自动调节保持不变, 即 MAP 升高导致维持 CBF 的血管收缩, 进而导致脑血容量和 ICP 减少[46]。脑损伤后 PR_x 值高可能导致压力自动调节紊乱, 此现象标志着预后较差。在 Donnelly 等人最近的一项临床研究中, PR_x 与脑损伤后的动脉葡萄糖水平显着相关[47]。

5. 脑温的监测

颅脑损伤后急性期体温过高的发生率在 68%~85%左右。高热是由创伤后脑炎、阵发性交感神经亢进、继发感染和下丘脑损伤引起的, 可能导致脑血流量和血容量增加, 颅内高压, 脑能量代谢率增加, 以及谷氨酸神经毒性增加[48]。谷氨酸活性升高引起的中毒与不良的预后相关。先前的研究表明, 高热能增加谷氨酸兴奋毒性。缺血性卒中后, 高热与更大的脑梗死体积和更差的临床结局有关, 可能会因为血管闭塞而使达到足够脑血流量的代偿能力降低[49]。体温过高在脑卒中后 6~10 天最常见, 并与大脑能量代谢紊乱有关。体温升高与脑葡萄糖浓度降低和 L/P > 25 的百分比增高有关, 而与颅内压升高或脑灌注压降低无关。较高的体温、较低的动脉血糖浓度和较低的脑血糖具有相关性。确定体温过高的病因, 并使用脑微透析评估同步的脑能量代谢状态, 有助于确定脑外伤后维持常温的益处/风险[50]。

6. 结语

对于最佳放置 ICP 监测仪的时机以及其对患者的影响的数据尚缺, 虽然目前可用的监测技术仍然有限, 但丰富的研究数据和技术的进步意味着近红外光谱现在可以在一些临床工作中使用, 并可能在未来发挥更大的作用, 开发可在床边连续测量脑氧代谢率($CMRO_2$)和脑血流量(CBF)的 NIRS 设备的进展将更加有用。在脑损伤患者中进行常规 ICP 和 CPP 监测可能无法可靠地检测出所有脑功能障碍或损害的发作。

ICP 监测虽然是基础, 但也是我们的终端。在颅内压变化之前, 颅内的很多指标都已经发生了变化, 最终的核心是导致了颅内压力的变化, 一旦出现了颅内压力的变化, 实际上是出现了一系列反应中的终末反应, 我们需要在颅内压变化之前发现生理病理改变并终止它。尽管 ICP 和 CPP 正常, 但仍可能发生脑缺氧和局部缺血, 这些观察结果强调了脑损伤患者需要多模式监测。理想的监测技术不仅能报告紊乱的程度, 还应确定可能的病理生理机制的可能性。每种监视技术都提供有关患者生理的不同方面的信息。多模式监测的进一步研究应集中于整合来自不同监测器的数据, 以识别脑功能障碍的不同模式, 并确定这些模式的临床和预后意义。对更好地了解脑功能障碍可能具有深远的治疗意义。

参考文献

- [1] 于德强. 动态颅内压监测对去骨瓣减压术后重度高血压脑出血患者预后的影响[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2019, 22(4): 419-425. <https://doi.org/10.12083/SYSJ.2019.04.129>
- [2] 高进保, 李学真, 李文德, 等. 动态颅内压监测在高血压小脑出血手术治疗中的应用[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2018, 21(12): 1325-1329.
- [3] Reithmeier, T., Isaak, R. and Sanchez-Porres, R. (2018) Neuromonitoring und Therapieentscheidungen auf der Intensivstation. *AINS Anesthesiologie Intensivmedizin*, **53**, 682-695. <https://doi.org/10.1055/s-0043-118971>
- [4] Bratton, S.L., Chestnut, R.M., Ghajar, J., et al. (2007) VIII. Intracranial Pressure Thresholds. *Journal of Neurotrauma*, **24**, S83-S86. <https://doi.org/10.1089/neu.2007.9988>
- [5] Nordstrom, C.H., Reinstrup, P., Xu, W., et al. (2003) Assessment of the Lower Limit for Cerebral Perfusion Pressure in Severe Head Injuries by Bedside Monitoring of Regional Energy Metabolism. *Anesthesiology*, **98**, 809-814. <https://doi.org/10.1097/0000542-200304000-00004>
- [6] 高亮. 美国第四版《重型颅脑损伤救治指南》解读[J]. 中华神经创伤外科电子杂志, 2017, 3(6): 321-324. <https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.2095-9141.2017.06.001>
- [7] Cnossen, M.C., Huijben, J.A., Mathieu, V., et al. (2017) Variation in Monitoring and Treatment Policies for Intracranial Hypertension in Traumatic Brain Injury: A Survey in 66 Neurotrauma Centers Participating in the CENTER-TBI Study. *Critical Care*, **21**, Article No. 233. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1816-9>
- [8] Lang, E.W., Kasproicz, M., Smielewski, P., et al. (2016) Outcome, Pressure Reactivity and Optimal Cerebral Perfusion Pressure Calculation in Traumatic Brain Injury: A Comparison of Two Variants. *Acta Neurochirurgica Supplement*, **122**, 221-223. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22533-3_44
- [9] Carney, N., Totten, A.M., O'Reilly, C., et al. (2017) Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury, Fourth Edition. *Neurosurgery*, **80**, 6-15. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001432>
- [10] Heldt, T., Zoerle, T., Teichmann, D., et al. (2019) Intracranial Pressure and Intracranial Elastance Monitoring in Neurocritical Care. *Annual Review of Biomedical Engineering*, **21**, 523-549. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-060418-052257>
- [11] Bruder, N., N'Zoghe, P., Graziani, N., et al. (1995) A Comparison of Extradural and Intraparenchymatous Intracranial Pressures in Head Injured Patients. *Intensive Care Medicine*, **21**, 850-852. <https://doi.org/10.1007/BF01700971>
- [12] Usmah, K., Richard, M.C., Charles, A., et al. (2015) Advances in Intracranial Pressure Monitoring and Its Significance in Managing Traumatic Brain Injury. *International Journal of Molecular Sciences*, **16**, 28979-28997. <https://doi.org/10.3390/ijms161226146>
- [13] Sheehan, J.R., Liu, X., Donnelly, J., et al. (2018) Clinical Application of Non-Invasive Intracranial Pressure Measurements. *BJA British Journal of Anaesthesia*, **121**, 500-501. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2018.04.017>
- [14] Robba, C., Bacigaluppi, S., Cardim, D., et al. (2016) Non-Invasive Assessment of Intracranial Pressure. *Acta Neurologica Scandinavica*, **134**, 4-21. <https://doi.org/10.1111/ane.12527>
- [15] Narayan, V., Mohammed, N., Savardekar, A.R., et al. (2018) Non-Invasive Intracranial Pressure Monitoring for Severe Traumatic Brain Injury in Children: A Concise Update on Current Methods. *World Neurosurgery*, **114**, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.02.159>
- [16] O'Brien, N.F., Maa, T. and Yeates, K.O. (2015) The Epidemiology of Vasospasm in Children with Moderate-to-Severe Traumatic Brain Injury. *Critical Care Medicine*, **43**, 674-685. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000000745>
- [17] Zhou, J., Li, J., Ye, T., et al. (2019) Ultrasound Measurements versus Invasive Intracranial Pressure Measurement Method in Patients with Brain Injury: A Retrospective Study. *BMC Medical Imaging*, **19**, Article No. 53. <https://doi.org/10.1186/s12880-019-0354-0>

- [18] Raboel, P.H., Bartek, J., andresen, M., *et al.* (2012) Intracranial Pressure Monitoring: Invasive versus Non-Invasive Methods—A Review. *Critical Care Research and Practice*, **2012**, Article ID: 950393. <https://doi.org/10.1155/2012/950393>
- [19] Rajajee, V., Fletcher, J.J., Rochlen, L.R., *et al.* (2012) Comparison of Accuracy of Optic Nerve Ultrasound for the Detection of Intracranial Hypertension in the Setting of Acutely Fluctuating vs Stable Intracranial Pressure: Post-Hoc Analysis of Data from a Prospective, Blinded Single Center Study. *Critical Care*, **16**, R79. <https://doi.org/10.1186/CC11336>
- [20] Robba, C., Cardim, D., Tajsic, T., *et al.* (2018) Non-Invasive Intracranial Pressure Assessment in Brain Injured Patients Using Ultrasound-Based Methods. *Acta Neurochirurgica Supplement*, **126**, 69-73. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65798-1_15
- [21] Giraudet, F., Longeras, F., Mulliez, A., *et al.* (2017) Noninvasive Detection of Alarming Intracranial Pressure Changes by Auditory Monitoring in Early Management of Brain Injury: A Prospective Invasive versus Noninvasive Study. *Critical Care*, **21**, 35. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1616-2>
- [22] Matthews, J.M., *et al.* (2018) An Embedded Device for Real-Time Noninvasive Intracranial Pressure Estimation. *Acta Neurochirurgica. Supplement*, **126**, 85-88. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65798-1_18
- [23] He, J.Q., *et al.* (2019) The Value of Managing Severe Traumatic Brain Injury during the Perioperative Period Using Intracranial Pressure Monitoring. *The Journal of Craniofacial Surgery*, **30**, 2217-2223. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000005861>
- [24] Chen, J.-H., *et al.* (2018) Multimodal Monitoring Combined with Hypothermia for the Management of Severe Traumatic Brain Injury: A Case Report. *Experimental and Therapeutic Medicine*, **15**, 4253-4258. <https://doi.org/10.3892/etm.2018.5994>
- [25] Harary, M., *et al.* (2018) Intracranial Pressure Monitoring—Review and Avenues for Development. *Sensors (Basel, Switzerland)*, **18**, 465. <https://doi.org/10.3390/s18020465>
- [26] Piccinini, A., *et al.* (2017) Intracranial Pressure Monitoring in Severe Traumatic Brain Injuries: A Closer Look at Level 1 Trauma Centers in the United States. *Injury*, **48**, 1944-1950. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.04.033>
- [27] Picetti, E., *et al.* (2017) Intracranial Pressure Monitoring after Primary Decompressive Craniectomy in Traumatic Brain Injury: A Clinical Study. *Acta Neurochirurgica*, **159**, 615-622. <https://doi.org/10.1007/s00701-017-3118-z>
- [28] Murkin, J.M. and Arango, M. (2009) Near-Infrared Spectroscopy as an Index of Brain and Tissue Oxygenation. *British Journal of Anaesthesia*, **103**, i3-13. <https://doi.org/10.1093/bja/aep299>
- [29] Davies, D.J., *et al.* (2015) Near-Infrared Spectroscopy in the Monitoring of Adult Traumatic Brain Injury: A Review. *Journal of Neurotrauma*, **32**, 933-941. <https://doi.org/10.1089/neu.2014.3748>
- [30] Kampfl, A., Pfausler, B., Denchev, D., *et al.* (1997) Near Infrared Spectroscopy (NIRS) in Patients with Severe Brain Injury and Elevated Intracranial Pressure. A Pilot Study. *Acta Neurochirurgica Supplement*, **70**, 112. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6837-0_35
- [31] Rescoe, E., *et al.* (2017) Cerebral Near-Infrared Spectroscopy Insensitively Detects Low Cerebral Venous Oxygen Saturations after Stage 1 Palliation. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **154**, 1056-1062. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2017.03.154>
- [32] Benni, P.B., *et al.* (2018) A Validation Method for Near-Infrared Spectroscopy Based Tissue Oximeters for Cerebral and Somatic Tissue Oxygen Saturation Measurements. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, **32**, 269-284. <https://doi.org/10.1007/s10877-017-0015-1>
- [33] Alish, H., *et al.* (2016) The Correlation between Brain Near-Infrared Spectroscopy and Cerebral Blood Flow in Piglets with Intracranial Hypertension. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, **121**, 255-260. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00760.2015>
- [34] Maas, A.I.R., Stocchetti, N. and Bullock, R. (2008) Moderate and Severe Traumatic Brain Injury in Adults. *The Lancet Neurology*, **7**, 728-741. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(08\)70164-9](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70164-9)
- [35] Liao, R., Li, J. and Liu, J. (2010) Volatile Induction/Maintenance of Anaesthesia with Sevoflurane Increases Jugular Venous Oxygen Saturation and Lumbar Cerebrospinal Fluid Pressure in Patients Undergoing Craniotomy. *European Journal of Anaesthesiology*, **27**, 369-376. <https://doi.org/10.1097/EJA.0b013e32832edc70>
- [36] Oertel, M., *et al.* (2002) Is CPP Therapy Beneficial for All Patients with High ICP? *Acta Neurochirurgica. Supplement*, **81**, 67-68. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6738-0_16
- [37] Bragin, D.E., Kameneva, M.V., Bragina, O.A., *et al.* (2016) Rheological Effects of Drag-Reducing Polymers Improve Cerebral Blood Flow and Oxygenation after Traumatic Brain Injury in Rats. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, **37**, 762. <https://doi.org/10.1177/0271678X16684153>
- [38] Robertson, C.S., *et al.* (1995) SjvO₂ Monitoring in Head-Injured Patients. *Journal of Neurotrauma*, **12**, 891-896.

- <https://doi.org/10.1089/neu.1995.12.891>
- [39] Gautschi, O.P., *et al.* (2009) Zerebrale Mikrodialyse—Möglichkeiten und Grenzen [Cerebral Microdialysis. Options and Limits]. *Anesthesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie: AINS*, **44**, 268-274. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1222434>
- [40] Langemann, H., *et al.* (1995) Experimental and Clinical Monitoring of Glucose by Microdialysis. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, **97**, 149-155. [https://doi.org/10.1016/0303-8467\(94\)00067-G](https://doi.org/10.1016/0303-8467(94)00067-G)
- [41] Hazell, A.S. (2007) Excitotoxic Mechanisms in Stroke: An Update of Concepts and Treatment Strategies. *Neurochemistry International*, **50**, 941-953. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2007.04.026>
- [42] Stiefel, M.F., *et al.* (2006) Conventional Neurocritical Care and Cerebral Oxygenation after Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurosurgery*, **105**, 568-575. <https://doi.org/10.3171/jns.2006.105.4.568>
- [43] Chamoun, R., Suki, D., Gopinath, S.P., Goodman, J.C. and Robertson, C. (2010) Role of Extracellular Glutamate Measured by Cerebral Microdialysis in Severe Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurosurgery*, **113**, 564-570. <https://doi.org/10.3171/2009.12.JNS09689>
- [44] Helbok, R., *et al.* (2011) Global Cerebral Edema and Brain Metabolism after Subarachnoid Hemorrhage. *Stroke*, **42**, 1534-1539. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.110.604488>
- [45] Cesak, T., *et al.* (2018) The Relationship between Intracranial Pressure and Lactate/Pyruvate Ratio in Patients with Subarachnoid Haemorrhage. *Bratislavske Lekarske Listy*, **119**, 139-142. <https://doi.org/10.4149/BLL.2018.027>
- [46] Wettervik, T.S., *et al.* (2021) Arterial Oxygenation in Traumatic Brain Injury-Relation to Cerebral Energy Metabolism, Autoregulation, and Clinical Outcome. *Journal of Intensive Care Medicine*, **36**, 1075-1083. <https://doi.org/10.1177/0885066620944097>
- [47] Donnelly, J., *et al.* (2015) Increased Blood Glucose Is Related to Disturbed Cerebrovascular Pressure Reactivity after Traumatic Brain Injury. *Neurocritical Care*, **22**, 20-25. <https://doi.org/10.1007/s12028-014-0042-4>
- [48] Chamoun, R., *et al.* (2010) Role of Extracellular Glutamate Measured by Cerebral Microdialysis in Severe Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurosurgery*, **113**, 564-570. <https://doi.org/10.3171/2009.12.JNS09689>
- [49] Mrozek, S., *et al.* (2012) Brain Temperature: Physiology and Pathophysiology after Brain Injury. *Anesthesiology Research and Practice*, **2012**, Article ID: 989487. <https://doi.org/10.1155/2012/989487>
- [50] Svedung-Wettervik, T.M., *et al.* (2021) Systemic Hyperthermia in Traumatic Brain Injury-Relation to Intracranial Pressure Dynamics, Cerebral Energy Metabolism, and Clinical Outcome. *Journal of Neurosurgical Anesthesiology*, **33**, 329-336. <https://doi.org/10.1097/ANA.0000000000000695>