

创伤性脑损伤微创治疗的预期进展：多学科整合视角

王振刚¹, 沈嵩民¹, 蔡进一¹, 徐相楠², 崔昌萌^{2*}

¹济宁医学院临床医学院, 山东 济宁

²济宁医学院附属医院神经外科, 山东 济宁

收稿日期: 2026年5月4日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

创伤性脑损伤(traumatic brain injury, TBI)是全球死亡和致残的主要原因之一, 其病理生理过程复杂, 临床管理高度依赖多学科协作。近年来, 随着微创技术的快速发展, 神经外科、神经重症医学及康复医学在TBI不同阶段的干预策略均取得了明显进展。本文围绕TBI急性期、亚急性期及慢性期的微创治疗策略进行系统综述, 比对其相较传统治疗的优势与局限, 并对未来研究方向进行展望, 重点强调了在临床上可行的转化途径。

关键词

创伤性脑损伤, 微创治疗, 多学科整合, 神经重症, 脊髓电刺激

Expected Advances in Minimally Invasive Treatment of Traumatic Brain Injury: A Multidisciplinary Integration Perspective

Zhengang Wang¹, Songmin Shen¹, Jinyi Cai¹, Xiangnan Xu², Changmeng Cui^{2*}

¹School of Clinical Medicine, Jining Medical University, Jining Shandong

²Department of Neurosurgery, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining Shandong

Received: May 4, 2026; accepted: May 29, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

Traumatic brain injury (TBI) is one of the leading causes of death and disability worldwide. Its

*通讯作者。

文章引用: 王振刚, 沈嵩民, 蔡进一, 徐相楠, 崔昌萌. 创伤性脑损伤微创治疗的预期进展: 多学科整合视角[J]. 临床医学进展, 2026, 16(6): 390-401. DOI: 10.12677/acm.2026.1662231

pathophysiology is complex and clinical management requires close multidisciplinary collaboration. In recent years, with the rapid development of minimally invasive techniques, important progress has been made in neurosurgical, neurocritical-care and rehabilitation strategies across different stages of TBI. This review systematically summarizes minimally invasive treatment strategies in the acute, subacute and chronic phases of TBI, compares their advantages and limitations with conventional approaches, and discusses future research directions with emphasis on clinically executable translational pathways.

Keywords

Traumatic Brain Injury, Minimally Invasive Treatment, Multidisciplinary Integration, Neurocritical Care, Spinal Cord Stimulation

Copyright © 2026 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

创伤性脑损伤(TBI)至今仍是全球范围内导致死亡和残疾的重要病因[1]。全球每年约新增 5000 万例 TBI, 几乎半数人群在一生中可能经历至少一次 TBI 事件。其经济负担同样巨大, 全球每年相关支出约 4000 亿美元, 约占世界国内生产总值的 0.5% [2]。中国人口约占全球总人口的 17%, TBI 患病负担高于多数国家。近期一项多中心前瞻性观察研究显示, TBI 患者中男性占 74%, 道路交通伤为首位病因, 总体病死率约为 5%, 其中中部地区病死率更高, 对患者家庭及社会均造成沉重负担[3]。

传统治疗主要依赖开颅手术、药物降颅压及常规康复, 但存在创伤大、并发症多、恢复周期长等问题。相比之下, 以精准干预、减少继发损伤、促进神经修复为特征的微创治疗逐渐成为研究热点[4]。近年来, 微创技术在 TBI 神经外科治疗中的应用日益广泛[5][6]。与传统开颅手术相比, 微创策略可更好保护脑组织完整性, 从而促进恢复并改善神经功能结局[6][7]。

从历史上看, TBI 治疗长期缺乏坚实的循证医学证据。大型开颅手术在部分临床试验中并未充分改善功能结局或死亡率[8]。而近年来, 微创手术联合溶栓治疗在降低死亡率方面显示出潜力, 尤其在与神经重症综合干预结合时更具优势[9]。本文系统梳理 TBI 急性期、亚急性期、慢性期及康复阶段的多学科最新研究进展, 以期对微创治疗策略优化提供结构化参考框架。

2. 病理生理基础

TBI 可分为原发性损伤和继发性损伤。原发性损伤是外力直接导致的脑组织机械性损害, 如脑挫裂伤等; 继发性损伤则指损伤后延迟出现的一系列病理过程, 包括炎症反应、细胞凋亡、氧化应激及多种并发症, 临床上亦可表现为混合型损伤[10][11]。

继发性损伤的关键机制主要包括: ① 颅内压升高。脑水肿、血脑屏障破坏和脑脊液循环障碍均可降低脑灌注压, 进而触发缺血缺氧性损害[12]; ② 轴索损伤与神经炎症。剪切力可造成弥漫性轴索损伤, 活化的胶质细胞释放促炎介质, 进一步加剧神经元死亡; ③ 代谢失衡。线粒体功能障碍及兴奋性氨基酸毒性可持续破坏神经网络稳态[13]。

临床上通常依据病情严重程度将 TBI 分为轻型、中型和重型[14]。按时间进展可分为急性期、亚急性期和慢性期, 尽管急性期与亚急性期的分界仍存在争议, 目前较为通用的划分为: 伤后 1~2 周为急性期,

2周至2个月为亚急性期,超过3个月为慢性期[15]。TBI分期不仅反映时间演变,更对应不同的病理生理特征与临床重点,因此各阶段治疗策略需因时而异、精准施策。

3. 急性期

TBI急性期病死风险高,是各级医疗机构救治的重点和难点。脑挫裂伤、颅内血肿、颅内压(intracranial pressure, ICP)快速升高以及缺血缺氧性损伤等问题,均要求尽快采取血流动力学稳定、颅压控制等紧急干预措施。

3.1. 腰大池引流联合亚低温与传统脑室外引流

Badhiwala 等对6项研究的Meta分析表明,外腰大池引流(external lumbar drainage, ELD)在ICP控制方面具有即时且显著的效果。ELD通过持续引流含脑脊液,能够降低蛛网膜下腔粘连及脑积水形成风险[16]。近期研究显示,ELD可将ICP由 >25 mmHg降至 <20 mmHg,且与传统脑室外引流(external ventricular drainage, EVD)相比,并发症如感染、脑疝发生率更低。若联合 $32^{\circ}\text{C}\sim 34^{\circ}\text{C}$ 亚低温治疗,可协同抑制神经炎症并进一步改善ICP控制。相关临床研究提示,该联合策略可改善重型TBI患者3个月预后[17]。

EVD在脑积水处理尤其合并颅内感染时具有明显优势。与ELD相比,EVD在减压过程中可减少未污染脑脊液暴露,并减缓炎症扩散;而ELD因创伤更小、颅内感染风险较低,在再出血处理中更具优势。一般认为,EVD适用于急性大量脑室内出血伴脑疝(初次手术)、疑似颅内感染及术后ICP监测;ELD则更适用于EVD效果不佳的再出血、凝血功能受损患者以及高龄、体弱、难以耐受麻醉者。临床实践中,两者常联合应用,以发挥EVD在急性感染/炎症情境中的优势和ELD微创性的互补价值,从而提高疗效并减少单一技术的局限[18]。因此,神经外科医师应结合适应证和自身经验,制定个体化治疗方案;同时,联合应用可能增加感染风险,需术者及护理团队保持高度警惕。

3.2. 机器人辅助立体定向血肿清除与神经内镜手术

传统开颅或去骨瓣减压一直是降低TBI患者ICP的重要手段,但对侧颅内血肿这一少见而严重的并发症提示了传统开颅的局限:其创伤较大、手术风险高,且在重型TBI中常面临急性脑膨出、清除后延迟性再出血等术中难题。相比之下,神经内镜手术因微创和安全性较高,已广泛用于梗阻性脑积水、深部脑病变(如基底节区出血)、脑室内血肿及分隔性硬膜下血肿等特定适应证[19]。随着微创神经外科器械持续升级,其应用范围亦扩展至脊柱手术、周围神经手术以及颅缝早闭修复等领域。Tanaka等[20]于2023年报道,采用序贯钻孔开颅联合内镜血肿清除,可在不行去骨瓣减压的情况下快速处理双侧创伤性颅内血肿,避免脑膨出并实现有效止血。

既往研究显示,神经内镜在脑内血肿处理方面较开颅手术具有术中失血更少、手术时间更短、手术部位感染率和脑脊液漏发生率更低等优势;但在病死率、改良Rankin量表(modified Rankin Scale, mRS)评分、血肿清除率及是否需要脑室引流等方面差异并不显著。需要指出的是,神经内镜在深部狭窄通道内操作时,存在视野稳定性不足和器械活动受限等问题(表1)[21]。比较研究还提示,其并发症发生率可能高于神经导航辅助穿刺引流。上述比较见表1。临床上,这一结果提示神经内镜的主要获益更集中于围手术期创伤控制和并发症减少,即减少失血、缩短手术时间并降低感染及脑脊液漏风险;而病死率、再出血率和mRS评分未达统计学差异,并不宜简单理解为两种术式在核心预后方面完全等效。一方面,死亡和长期功能恢复受入院GCS评分、血肿部位、合并损伤、术后重症管理及康复介入等多因素影响,单一术式的边际效应可能被稀释;另一方面,现有研究样本量和分层分析不足,可能导致对病死率及功能结局差异的检出能力有限。因此,神经内镜更适合作为降低手术创伤和改善围手术期安全性的策略,而

其对长期神经功能结局的独立改善仍需更大样本、按血肿部位和损伤严重程度分层的前瞻性研究验证。

近年对机器人辅助立体定向血肿清除(如 ROSA)、神经内镜及传统开颅的比较研究显示,机器人辅助手术具有较明显优势。与神经内镜相比,ROSA 组手术时间更短、术中失血更少、输血需求更低;与开颅相比,ROSA 在血肿清除率、失血控制及术后结局方面更优。值得注意的是,ROSA 组肺部感染更少,出院时 mRS 评分更低,且 3 个月随访功能恢复进一步改善[22]。ROSA 更适用于丘脑出血、脑干血肿等深部或功能区病变,以及需要多模态影像融合的复杂病例,其核心优势在于结合 AI 导航与精确器械控制,实现微创路径规划[23]。

Table 1. Comparison of therapeutic outcomes between neuroendoscopy and craniotomy

表 1. 神经内镜与开颅手术疗效比较

结局指标	神经内镜(NE)	开颅手术	P 值
术中失血量(mL)	明显更少↓	较高	<0.001
手术时间(min)	更短↓	更长	<0.001
感染发生率	更低↓	更高	<0.001
脑脊液漏发生率	更低↓	更高	0.025
血肿清除率(%)	91.6~95.2	90.0~90.7	0.094
病死率	11.80%	16.90%	0.246
再出血率	5.90%	11.20%	0.167
mRS 评分	无显著差异	无显著差异	0.483
分流需求	12.00%	21.90%	0.575

Table 2. Comparison of major outcomes after propensity score matching (robot-assisted stereotactic surgery versus frame-based method)

表 2. 倾向评分匹配后主要结局比较(机器人辅助立体定向手术与有框架方法)

结局指标	机器人组(n = 40)	框架组(n = 40)	P 值
血肿清除率(%)	78.7 [69.7~91.8]	66.2 [48.1~88.2]	0.032
住院时间(d)	12 [8~15]	15 [13~20]	0.001
残余血肿量(mL)	5.8 [2.3~10.9]	8.8 [5.0~18.2]	0.077
手术时间(min)	84 ± 13	80 ± 16	0.151
术后并发症(%)	25.0	40.0	0.152
出院时 mRS 4~5 级(%)	87.5	82.5	0.619

近期研究还将机器人辅助立体定向手术与传统有框架方法进行比较(表 2)[24]。尽管机器人辅助手术优势明显,但仍存在重要局限:当前柔性器械自由度不足,且缺乏力反馈机制,增加了医源性血管损伤风险。2025 年新近研发的单孔双臂可转向机器人内镜采用 9 自由度设计,在一定程度上改善了深部路径调整问题,但其均方根误差(0.66~0.98 mm)在功能区手术中仍可能影响精度[25]。总体而言,对于基底节区出血,神经内镜的血肿清除率优于开颅(95.2%比 90.7%);但在丘脑出血等脑室旁病变中,其操作稳定性相对受限。机器人系统虽精度更高,但因成本高、需多学科协同,尚难在基层医院广泛推广。主要结局见表 2。表 2 显示,机器人辅助手术在血肿清除率和住院时间方面达到统计学优势,但残余血肿量、手

术时间、术后并发症及出院时 mRS 4~5 级比例未见显著差异。其临床启示在于：机器人系统可能首先通过提高定位精度和缩短住院恢复过程体现价值，而对短期重残率的改善尚不充分，提示术后神经重症管理、早期康复和长期随访仍是决定功能预后的关键环节。未来研究应将“技术精度指标”与“患者中心结局”同步纳入评价体系，避免仅以清除率替代功能获益。

3.3. 多模态颅内压监测

ICP 监测长期以来一直是 TBI 治疗的重要支柱。但随着对 TBI 病理生理认识的深化，人们逐渐认识到，单纯以固定阈值解读 ICP 已难以适应临床复杂性[26]。因此，多模态监测整合及以 ICP 为导向的治疗仍是重型 TBI 管理的核心[27]。一项前瞻性研究纳入 18 例接受有创 ICP 监测的成人重症患者(包括蛛网膜下腔出血、脑实质出血和缺血性卒中；定义颅内高压为 ICP > 20 mmHg 并持续 ≥ 5 min，共分析 60 次监测，平均年龄 52 岁)，同时评估了 5 类无创参数：视神经鞘直径(optic nerve sheath diameter, ONSD)、经颅多普勒(transcranial Doppler, TCD)搏动指数(pulsatility index, PI)、脑 CT 五点评分，以及 Brain4Care (B4c)无创 ICP 监测波形参数——达峰时间(time-to-peak, TTP)和 P2/P1 比值。结果显示，TCD 来源 PI 联合 B4c 波形参数(P2/P1 比值及 TTP)对颅内高压的诊断效能最佳，优于单一指标[28]。目前，多模态无创联合方案在提高颅内高压识别率方面具有潜力，但不同临床场景下最佳参数组合仍需进一步明确。

3.4. 目标化高渗盐水输注

维持正常 ICP 和脑灌注压、预防继发性脑损伤(secondary brain injury, SBI)是急性期 TBI 治疗的核心目标。高渗治疗——包括甘露醇和高渗盐水——是急性颅压增高药物治疗的基石[29]。一项针对 1~12 岁颅压增高患儿(改良格拉斯哥昏迷评分 ≤ 8 分)并采用脑实质内导管监测 ICP 的开放性随机对照试验比较了高渗盐水(hypertonic saline, HTS)与甘露醇的疗效[30]。主要结局为 72 h 内达到平均 ICP < 20 mmHg 目标的患者比例，次要结局包括相关并发症、致残和死亡。结果显示，HTS 组在达到目标 ICP、改善 GCS 评分、降低死亡率、缩短 PICU 住院时间及减少出院后神经功能障碍方面均优于甘露醇组。既往综述亦支持 HTS 在 ICP 控制方面优于甘露醇。

不过，HTS 应用过程中可能引起高钠血症，因此需严密监测血钠水平，并依据个体情况调整给药剂量和输注速度[31]。总体而言，目标化 HTS 输注联合精准 ICP 监测，可快速降低颅压、改善脑灌注，并通过个体化滴定减轻继发性损伤。

4. 亚急性期

亚急性期 TBI 患者虽然病情相对趋于稳定，但 ICP 监测和控制仍然关键。该阶段强调持续观察与主动干预，治疗目标主要包括促进神经功能恢复、预防并发症及为后续康复奠定基础[32] [33]。

4.1. 干细胞与生物材料联合治疗

干细胞治疗是近年来极具前景的研究方向[34]。在神经修复领域，纳米纤维或水凝胶支架可提供三维生长微环境，提高干细胞存活和定向迁移能力[35] [36]。此类“生物材料 + 干细胞/外泌体 + 辅助治疗”的综合策略，为 TBI 后组织再生与神经网络修复提供了新路径。

2024 年，山东大学李刚教授和刘宏教授团队开发了超声驱动的压电纤维素纳米纤维原位无线电刺激系统。该生物来源纳米纤维具有良好生物相容性和内在压电特性，在超声刺激下可向 NSC 提供可控电信号，加速其向功能性神经元分化并促进 TBI 修复[37]。此外，磁性纳米颗粒或抗体功能化生物材料也可增强干细胞向损伤区的定向归巢，减少异位分布并提高治疗精度[38]。

干细胞生物工程覆盖了从单细胞基因调控网络到组织系统互作的多层级复杂问题，被认为是突破再

生医学和细胞治疗瓶颈的关键路径[39]。未来研究需进一步明确细胞来源、递送方式、剂量窗口及长期安全性，并将组织修复指标与认知、运动和生活质量等患者中心结局相结合。

4.2. 脑氧代谢监测(多模态)

脑氧监测是多模态神经监护的重要组成部分[40]。TBI后脑血流自动调节受损，患者易发生脑缺血或充血。颈静脉球血氧饱和度(SjvO₂)、脑组织氧分压(PbtO₂)及近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)等脑氧代谢监测手段，可动态反映脑氧供给(DO₂)与脑氧消耗(CMRO₂)之间的平衡[41]。作为微创重症监护的重要组成部分，脑氧监测强调与ICP、脑电图(EEG)、微透析参数(如乳酸/丙酮酸比)、SjvO₂及PbtO₂等多模态数据整合[42]。

例如，当ICP升高并伴PbtO₂下降时，应尽快实施降颅压干预；若ICP正常而SjvO₂下降，则可能提示脑血管痉挛。此类信息可指导针对性的重症管理，实现精准分层治疗并预防并发症。观察性研究提示，PbtO₂导向治疗可改善TBI患者结局[43]。Payen等[44]于2023年在《Lancet》发表研究，比对单纯ICP监测与ICP联合PbtO₂监测在重型TBI中的作用，尽管6个月不良神经结局比例未见显著下降，但作者仍强调多模态脑氧监测的重要临床意义。总体而言，微创ICP、SjvO₂、PbtO₂监测联合无创NIRS，有助于优化个体化治疗、减少继发损伤并改善预后；其最佳阈值和干预策略仍需高质量研究进一步验证。

4.3. 靶向抗炎治疗

脑损伤亚急性期，病灶区炎症反应持续存在并可进一步加剧，表现为小胶质细胞和星形胶质细胞活化、IL-1 β 和TNF- α 等炎症介质释放及自由基生成。这些变化可进一步破坏血脑屏障、加重脑水肿并诱导神经元凋亡[45][46]。靶向抗炎治疗可通过特异性抑制关键炎症介质或调控胶质细胞功能，打断这一恶性循环。

例如，有研究表明，丘脑星形胶质细胞中GAT-3蛋白缺失可导致神经元高兴奋性，而补充GAT-3可显著缓解该病理状态[47]。补体系统等炎症通路也是亚急性期干预的重要靶点，相关研究提示其调控可能有助于减轻继发损伤并改善长期结局[48]。对星形胶质细胞GAT-3的调控已被证实可降低小鼠癫痫发作频率和死亡率[47]，提示亚急性期实施靶向抗炎干预，可能为神经功能恢复创造关键窗口。

近年来，GFAP、S100B、Tau蛋白等生物标志物联合检测，使炎症反应动态监测成为可能[49]。识别特定炎症细胞因子表达谱，有助于制定个体化治疗策略。总体而言，亚急性期靶向抗炎治疗的价值在于，通过微创治疗手段联合靶向药物，精准调控炎症微环境，阻断继发损伤链条并为神经修复创造条件。未来仍需加强基础与临床协同研究，推动其临床转化。

5. 慢性期

TBI慢性期常表现为持续性后遗症，包括认知障碍、情绪障碍(如抑郁、焦虑)、慢性头痛及创伤后癫痫等[50]。该阶段治疗目标主要在于减轻远期功能缺损、促进中重型患者觉醒，并推动运动与生活功能康复。

5.1. 脊髓电刺激

脊髓电刺激(spinal cord stimulation, SCS)是通过植入电极向脊髓传递电信号，从而调节神经网络活动的技术[51][52]。已有病例报道显示，对严重意识障碍(disorders of consciousness, DoC)TBI患者实施SCS，采用4.5 V振幅、210 μ s脉宽、70 Hz频率及8:00~20:00每15 min开/关循环刺激方案，可显著改善意识状态[53]。Qin等近期建立预测模型，纳入53例DoC患者(TBI-DoC 31例，非TBI-DoC 22例)，通过静息态功能MRI分析SCS治疗前低频振幅(ALFF)变化，并于治疗后3个月采用CRS-R评分评估疗效。结

果发现,对SCS有反应的患者在后扣带回和枕叶等区域存在特征性ALFF模式,提示特定脑区ALFF差异可能有助于预测治疗反应[54]。

尽管SCS可改善长期DoC患者意识状态,但其有创性限制了广泛应用。采用微创方式实施短程脊髓电刺激(short-term SCS, st-SCS)可能在疗效与风险之间取得更佳平衡[55]。Zhuang等报道,23例DoC患者接受SCS后,后部脑区局部信息加工能力增强,可能促进意识恢复[56];Huang等的观察性研究显示,14例棘手脑干出血继发意识障碍患者中,10例(70%)在14 d st-SCS治疗后有反应[57]。电极通常置于高位颈段,未来仍需进一步探索更优的穿刺部位和刺激参数。现有证据提示,不同频率的时间效应存在差异:5 Hz st-SCS于治疗2周时CRS-R评分改善显著($p = 0.027$),而70 Hz st-SCS在治疗结束后1周呈现延迟但持续的效果($p = 0.004$) [55]。这提示5 Hz和70 Hz均可促进意识恢复,而70 Hz可能具有更持久的获益。

目前SCS的适应证主要包括:①意识障碍为急性起病,而非进行性神经系统恶化所致;②病程持续超过1个月,且连续4周内无进行性改善或恶化;③符合最小意识状态(minimally conscious state, MCS)诊断标准,并经CRS-R评估证实,在超过50%的测试中至少出现视觉追踪/凝视或伤害刺激定位之一;④无严重并存疾病或手术禁忌证[58]。尽管SCS在DoC管理中前景可期,但仍亟需大样本干预研究以阐明其作用机制并优化刺激方案[59]。

5.2. 经颅磁刺激

经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)是一种无创脑功能调控技术,通过线圈内短暂电流产生瞬时高强度磁场,从而兴奋或抑制线圈下方局部脑区。理论上可作用于多种皮层区域,但现有研究多集中于运动皮层,并可诱发运动诱发电位[60]。与有创SCS不同,TMS是一种非侵入性治疗方式,已在TBI慢性后遗症处理方面显示潜力,包括认知障碍、情绪障碍、计算障碍及语言功能障碍等。

重型TBI患者常伴终身性神经精神损害[61],并与情绪失调、自杀风险升高以及创伤后应激障碍(PTSD)、重性抑郁障碍(MDD)和精神分裂症等精神疾病的发生或加重密切相关[62]。重复经颅磁刺激(repetitive TMS, rTMS)已被证实可缓解TBI患者PTSD症状方面具有可行性和有效性[63],并显示出明确的抗抑郁效应[64][65]。其在精神分裂症中的潜在获益虽有初步报道,但高质量证据仍不足,尚不能得出确定结论。总体而言,TMS虽不能直接提供生命支持,但在功能恢复、感觉/语言康复及精神心理状态改善方面具有重要的辅助价值,是值得进一步拓展的康复策略。

5.3. 远程监测与居家康复

无线生物电子传感器的发展正推动医疗诊断、环境监测及国防等多个领域进步,其中关键技术之一是生物传感单元与无线信号传导模块的无缝整合。无线接口使脑植入装置能够与体外系统进行远程交互,已成为现代神经技术研究和临床应用的重要组成部分[66]。无线脑电图(EEG)系统即是这一趋势的典型代表[67]。

Raso等[68]开展的一项前瞻性单中心随机对照试验显示,重型TBI患者传统住院项目的日均费用为262欧元,而远程医疗模式仅为93欧元,且两者临床疗效相当,提示远程监测可作为重型神经疾病长期管理的高性价比选择。随着无线传感器、脑电采集及人工智能早期预警系统发展,居家监测平台有望进一步识别慢性脑积水、癫痫风险及认知功能下降,并减少不必要的再住院。

对于需长期监护的老年患者,远程监测尤具优势,可明显减轻家庭经济与照护负担[69]。除生命体征随访外,无线平台在远程认知功能评估中亦显示出良好的应用前景[70]。将远程监测与居家康复相结合,有望推动TBI连续性管理模式发生深刻变革。

6. 未来展望

多学科协作虽已成为临床实践的重要基础，但未来仍需进一步融合基因编辑与微创递送技术，以优化神经功能重建。跨学科、跨产业合作与转化研究将是推动 TBI 以及高血压脑出血、脑肿瘤、神经精神疾病等相关领域技术进步的关键。

人工智能(artificial intelligence, AI)作为快速发展的前沿领域，在优化临床决策和治疗路径方面具有巨大潜力。例如，AI 驱动的预测模型可进一步提高无线 ICP 传感器的准确性和临床适用性。面向 TBI 微创治疗，AI 不应仅停留在风险预测层面，而应嵌入具体临床流程：术前可融合 CT/CTA、MRI、血肿形态、脑室受压程度及功能区图谱，自动生成避开皮质静脉、重要传导束和功能区的候选穿刺通道；术中可结合机器人定位误差、器械偏移和实时影像反馈动态修正路径；术后则可利用 ICP、PbtO₂、EEG、NIRS 及生命体征的连续数据建立早期预警模型，辅助识别再出血、颅内高压和脑氧代谢失衡。可执行的研究方向包括建立多中心 TBI 影像 - 监测 - 结局数据库，开展 AI 路径规划与人工规划的随机或前瞻性对照研究，并以路径偏差、手术时间、出血控制、并发症和 6 个月功能结局作为联合终点。

可降解支架联合干细胞治疗等新型生物材料正在成为促进轴突再生和神经网络修复的重要工具。未来需开展更多比较研究，以筛选兼具成本效益和临床可行性的材料体系。在生物材料方向，未来应围绕 TBI 后炎症微环境复杂、损伤边界不规则、递送通道需尽量微创等关键难点开展研究。可降解支架的设计应同时满足可注射或经小通道植入、可控降解、低免疫原性、可负载细胞/外泌体/抗炎因子及可影像追踪等要求；评价指标除组织修复外，还应包括脑水肿、胶质瘢痕、轴突再生、癫痫发生率和认知功能恢复。SCS 方面，未来可将 AI 用于刺激参数个性化优化：依据 CRS-R 评分、EEG 连接度、rs-fMRI 低频振幅及睡眠 - 觉醒节律，动态调整频率、脉宽、振幅和开关周期，并比较 5 Hz 与 70 Hz 等方案在早期反应和持续获益上的差异。远程监测平台则可作为慢性期随访工具，将居家生命体征、睡眠、认知测试和可穿戴运动数据纳入闭环康复管理。

因此，未来 TBI 微创治疗研究宜从“单项技术展示”转向“分期、分型、闭环管理”的验证路径：急性期重点验证机器人/内镜路径规划与多模态监测对安全性的提升；亚急性期重点验证抗炎、生物材料和细胞递送对继发损伤控制及神经修复的作用；慢性期重点验证 SCS、TMS 和远程康复对意识、认知和生活质量的长期获益。

7. 结论

在多学科创新驱动下，TBI 微创治疗已逐步形成覆盖急性期、亚急性期和慢性期的全周期管理框架。然而，目前仍面临若干关键问题：其一，缺乏大样本随机对照试验验证长期疗效；其二，多模态监测数据整合尚缺少统一标准。未来应重点推进学科交叉整合、AI 辅助决策系统建设及先进生物材料研发，加速微创技术由基础研究向临床应用转化。通过最大限度减少治疗创伤并提高干预精度，微创策略正在重塑 TBI 诊疗模式，为改善生存率和功能结局提供新路径。持续完善技术规范并强化转化研究，将是实现 TBI 诊疗突破的关键。

作者贡献

崔昌萌、王振刚负责研究构思与设计；沈嵩民、蔡进一、徐相楠等负责资料收集，并提供技术和材料支持。

利益冲突

所有作者声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Maas, A.I.R., Menon, D.K., Adelson, P.D., Andelic, N., Bell, M.J., Belli, A., *et al.* (2017) Traumatic Brain Injury: Integrated Approaches to Improve Prevention, Clinical Care, and Research. *The Lancet Neurology*, **16**, 987-1048. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(17\)30371-x](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(17)30371-x)
- [2] Taylor, C.A., Bell, J.M., Breiding, M.J. and Xu, L. (2017) Traumatic Brain Injury-Related Emergency Department Visits, Hospitalizations, and Deaths—United States, 2007 and 2013. *MMWR. Surveillance Summaries*, **66**, 1-16. <https://doi.org/10.15585/mmwr.ss6609a1>
- [3] Gao, G., Wu, X., Feng, J., Hui, J., Mao, Q., Lecky, F., *et al.* (2020) Clinical Characteristics and Outcomes in Patients with Traumatic Brain Injury in China: A Prospective, Multicentre, Longitudinal, Observational Study. *The Lancet Neurology*, **19**, 670-677. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(20\)30182-4](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(20)30182-4)
- [4] Magid-Bernstein, J., Girard, R., Polster, S., Srinath, A., Romanos, S., Awad, I.A., *et al.* (2022) Cerebral Hemorrhage: Pathophysiology, Treatment, and Future Directions. *Circulation Research*, **130**, 1204-1229. <https://doi.org/10.1161/circresaha.121.319949>
- [5] Labib, M.A., Shah, M., Kassam, A.B., Young, R., Zucker, L., Maioriello, A., *et al.* (2017) The Safety and Feasibility of Image-Guided Brainpath-Mediated Transsulcal Hematoma Evacuation: A Multicenter Study. *Neurosurgery*, **80**, 515-524. <https://doi.org/10.1227/neu.0000000000001316>
- [6] Sujjantararat, N., Teclé, N.E., Pierson, M., Urquiaga, J.F., Quadri, N.F., Ashour, A.M., *et al.* (2018) Trans-Sulcal Endoport-Assisted Evacuation of Supratentorial Intracerebral Hemorrhage: Initial Single-Institution Experience Compared to Matched Medically Managed Patients and Effect on 30-Day Mortality. *Operative Neurosurgery*, **14**, 524-531. <https://doi.org/10.1093/ons/opx161>
- [7] O'Carroll, C.B., Brown, B.L. and Freeman, W.D. (2021) Intracerebral Hemorrhage: A Common Yet Disproportionately Deadly Stroke Subtype. *Mayo Clinic Proceedings*, **96**, 1639-1654. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2020.10.034>
- [8] Mendelow, A.D., Gregson, B.A., Rowan, E.N., Murray, G.D., Gholkar, A. and Mitchell, P.M. (2013) Early Surgery versus Initial Conservative Treatment in Patients with Spontaneous Supratentorial Lobar Intracerebral Haematomas (STICH II): A Randomised Trial. *The Lancet*, **382**, 397-408. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)60986-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)60986-1)
- [9] Hanley, D.F., Thompson, R.E., Rosenblum, M., Yenokyan, G., Lane, K., McBee, N., *et al.* (2019) Efficacy and Safety of Minimally Invasive Surgery with Thrombolysis in Intracerebral Haemorrhage Evacuation (MISTIE III): A Randomised, Controlled, Open-Label, Blinded Endpoint Phase 3 Trial. *The Lancet*, **393**, 1021-1032. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(19\)30195-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(19)30195-3)
- [10] Xie, B., Wang, Y., Lin, Y., Mao, Q., Feng, J., Gao, G., *et al.* (2019) Inhibition of Ferroptosis Attenuates Tissue Damage and Improves Long-Term Outcomes after Traumatic Brain Injury in Mice. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, **25**, 465-475. <https://doi.org/10.1111/cns.13069>
- [11] Li, D., Ji, J., Xu, Y., Ni, H., Rui, Q., Liu, H., *et al.* (2018) Inhibition of Lats1/p-YAP1 Pathway Mitigates Neuronal Apoptosis and Neurological Deficits in a Rat Model of Traumatic Brain Injury. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, **24**, 906-916. <https://doi.org/10.1111/cns.12833>
- [12] Changa, A.R., Czeisler, B.M. and Lord, A.S. (2019) Management of Elevated Intracranial Pressure: A Review. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, **19**, Article No. 99. <https://doi.org/10.1007/s11910-019-1010-3>
- [13] Pavlovic, D., Pekic, S., Stojanovic, M. and Popovic, V. (2019) Traumatic Brain Injury: Neuropathological, Neurocognitive and Neurobehavioral Sequelae. *Pituitary*, **22**, 270-282. <https://doi.org/10.1007/s11102-019-00957-9>
- [14] Blennow, K., Brody, D.L., Kochanek, P.M., Levin, H., McKee, A., Ribbers, G.M., *et al.* (2016) Traumatic Brain Injuries. *Nature Reviews Disease Primers*, **2**, Article No, 16084. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2016.84>
- [15] Marshall, L.F., Marshall, S.B., Klauber, M.R., *et al.* (1992) The Diagnosis of Head Injury Requires a Classification Based on Computed Axial Tomography. *Journal of Neurotrauma*, **9**, S287-S292.
- [16] Badhiwala, J., Lumba-Brown, A., Hawryluk, G.W.J. and Ghajar, J. (2021) External Lumbar Drainage Following Traumatic Intracranial Hypertension: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neurosurgery*, **89**, 395-405. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyab181>
- [17] Qi, H.W., Zeng, W.J., Guo, H.J., Liu, Y.S. and Zhang, L.Z. (2023) Research Progress on the Treatment of Intracranial Hypertension Caused by Traumatic Brain Injury by External Lumbar Drainage. *Journal of International Neurology and Neurosurgery*, **50**, 80-83. (In Chinese)
- [18] Xia, D., Jiang, X., Li, Z., Jin, Y. and Dai, Y. (2019) External Ventricular Drainage Combined with Continuous Lumbar Drainage in the Treatment of Ventricular Hemorrhage. *Therapeutics and Clinical Risk Management*, **15**, 677-682. <https://doi.org/10.2147/term.s207750>
- [19] Ma, H., Peng, W., Xu, S., Liang, X., Zhao, R., Lv, M., *et al.* (2025) Advancements of Endoscopic Surgery for Spontaneous

- Intracerebral Hemorrhage. *World Neurosurgery*, **193**, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.10.107>
- [20] Tanaka, T., Liu, X., Momozaki, N. and Honda, E. (2023) Endoscopic-Assisted Removal of Bilateral Traumatic Intracerebral Hemorrhage: A Case Report. *Surgical Neurology International*, **14**, Article 288. https://doi.org/10.25259/sni_268_2023
- [21] Lobo, K., Natali, L.D., Kotecki, L.B.C.D.C., Santos, C.F.N.S., Filho, F.D.S.M.M., de Freitas, M.T.O., *et al.* (2025) Comparison of Minimally Invasive Neuroendoscopic Evacuation and Conventional Open Surgery for Spontaneous Cerebellar Hemorrhage: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neurosurgical Review*, **48**, Article No. 250. <https://doi.org/10.1007/s10143-025-03422-3>
- [22] Wu, H., Lu, B., Wang, W., *et al.* (2025) Efficacy and Prognosis of ROSA Robot-Assisted Stereotactic Intracranial Hematoma Removal in Patients with Cerebral Hemorrhage in Basal Ganglia Region: Comparison with Craniotomy and Neuroendoscopy. *Translational Stroke Research*, **16**, 1594-1605.
- [23] Musa, M.J., Carpenter, A.B., Kellner, C., Sigounas, D., Godage, I., Sengupta, S., *et al.* (2022) Minimally Invasive Intracerebral Hemorrhage Evacuation: A Review. *Annals of Biomedical Engineering*, **50**, 365-386. <https://doi.org/10.1007/s10439-022-02934-z>
- [24] Lou, L., Wang, H., Chen, M., Zhu, J. and Li, S. (2025) Robot Assisted Stereotactic Surgery Improves Hematoma Evacuation in Intracerebral Hemorrhage Compared to Frame Based Method. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 12427. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97738-1>
- [25] Qi, R., Malhotra, N., Brumfiel, T.A., Hoang, K. and Desai, J.P. (2025) Development of a Single Port Dual Arm Robotically Steerable Endoscope for Neurosurgical Applications. *npj Robotics*, **3**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1038/s44182-024-00017-w>
- [26] Bernard, F. (2023) Neurotrauma and Intracranial Pressure Management. *Critical Care Clinics*, **39**, 103-121. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2022.08.002>
- [27] Munakomi, S. and Das, J.M. (2025) Intracranial Pressure Monitoring. *StatPearls*.
- [28] de Moraes, F.M., Adissy, E.N.B., Rocha, E., Barros, F.C.D., Freitas, F.G.R., Miranda, M., *et al.* (2023) Multimodal Monitoring Intracranial Pressure by Invasive and Noninvasive Means. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 18404. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45834-5>
- [29] Schizodimos, T., Soulountsi, V., Iasonidou, C. and Kapravelos, N. (2020) An Overview of Management of Intracranial Hypertension in the Intensive Care Unit. *Journal of Anesthesia*, **34**, 741-757. <https://doi.org/10.1007/s00540-020-02795-7>
- [30] Rameshkumar, R., Bansal, A., Singhi, S., Singhi, P. and Jayashree, M. (2020) Randomized Clinical Trial of 20% Mannitol versus 3% Hypertonic Saline in Children with Raised Intracranial Pressure Due to Acute CNS Infections. *Pediatric Critical Care Medicine*, **21**, 1071-1080. <https://doi.org/10.1097/pcc.0000000000002557>
- [31] Khanna, S., Davis, D., Peterson, B., Fisher, B., Tung, H., O'Quigley, J., *et al.* (2000) Use of Hypertonic Saline in the Treatment of Severe Refractory Posttraumatic Intracranial Hypertension in Pediatric Traumatic Brain Injury. *Critical Care Medicine*, **28**, 1144-1151. <https://doi.org/10.1097/00003246-200004000-00038>
- [32] Mostert, C.Q.B., Singh, R.D., Gerritsen, M., Kompanje, E.J.O., Ribbers, G.M., Peul, W.C., *et al.* (2022) Long-Term Outcome after Severe Traumatic Brain Injury: A Systematic Literature Review. *Acta Neurochirurgica*, **164**, 599-613. <https://doi.org/10.1007/s00701-021-05086-6>
- [33] Tan, C.O., Meehan, W.P., Iverson, G.L. and Taylor, J.A. (2014) Cerebrovascular Regulation, Exercise, and Mild Traumatic Brain Injury. *Neurology*, **83**, 1665-1672. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000000944>
- [34] Zakrzewski, W., Dobrzyński, M., Szymonowicz, M. and Rybak, Z. (2019) Stem Cells: Past, Present, and Future. *Stem Cell Research & Therapy*, **10**, Article No. 68. <https://doi.org/10.1186/s13287-019-1165-5>
- [35] Maclean, F.L., Rodriguez, A.L., Parish, C.L., Williams, R.J. and Nisbet, D.R. (2016) Integrating Biomaterials and Stem Cells for Neural Regeneration. *Stem Cells and Development*, **25**, 214-226. <https://doi.org/10.1089/scd.2015.0314>
- [36] Yuan, J., Botchway, B.O.A., Zhang, Y., Wang, X. and Liu, X. (2020) Combined Bioscaffold with Stem Cells and Exosomes Can Improve Traumatic Brain Injury. *Stem Cell Reviews and Reports*, **16**, 323-334. <https://doi.org/10.1007/s12015-019-09927-x>
- [37] Wang, W., Li, K., Xia, B., Ma, W., Li, Y., Zhang, J., *et al.* (2024) Piezotronic Effect for *in Situ* Electrostimulation of Neural Stem Cell Therapy for Nerve Injury. *Nano Energy*, **120**, Article ID: 109181. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.109181>
- [38] Rust, R. and Tackenberg, C. (2024) Stem Cell Therapy for Repair of the Injured Brain: Five Principles. *The Neuroscientist*, **30**, 10-16. <https://doi.org/10.1177/10738584221110100>
- [39] Tewary, M., Shakiba, N. and Zandstra, P.W. (2018) Stem Cell Bioengineering: Building from Stem Cell Biology. *Nature Reviews Genetics*, **19**, 595-614. <https://doi.org/10.1038/s41576-018-0040-z>
- [40] Kirkman, M.A. and Smith, M. (2016) Brain Oxygenation Monitoring. *Anesthesiology Clinics*, **34**, 537-556.

- <https://doi.org/10.1016/j.anclin.2016.04.007>
- [41] Meng, L., Gruenbaum, S.E., Dai, F. and Wang, T. (2018) Physiology, Intervention, and Outcome: Three Critical Questions about Cerebral Tissue Oxygen Saturation Monitoring. *Minerva Anestesiologica*, **84**, 599-614. <https://doi.org/10.23736/s0375-9393.18.12476-x>
- [42] Hemphill, J.C., Andrews, P. and De Georgia, M. (2011) Multimodal Monitoring and Neurocritical Care Bioinformatics. *Nature Reviews Neurology*, **7**, 451-460. <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2011.101>
- [43] Bernard, F., Barsan, W., Diaz-Arrastia, R., Merck, L.H., Yeatts, S. and Shutter, L.A. (2022) Brain Oxygen Optimization in Severe Traumatic Brain Injury (BOOST-3): A Multicentre, Randomised, Blinded-Endpoint, Comparative Effectiveness Study of Brain Tissue Oxygen and Intracranial Pressure Monitoring versus Intracranial Pressure Alone. *BMJ Open*, **12**, e060188. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-060188>
- [44] Payen, J., Launey, Y., Chabanne, R., Gay, S., Francony, G., Gergele, L., *et al.* (2023) Intracranial Pressure Monitoring with and without Brain Tissue Oxygen Pressure Monitoring for Severe Traumatic Brain Injury in France (OXY-TC): An Open-Label, Randomised Controlled Superiority Trial. *The Lancet Neurology*, **22**, 1005-1014. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(23\)00290-9](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(23)00290-9)
- [45] Bodnar, C.N., Watson, J.B., Higgins, E.K., Quan, N. and Bachstetter, A.D. (2021) Inflammatory Regulation of CNS Barriers after Traumatic Brain Injury: A Tale Directed by Interleukin-1. *Frontiers in Immunology*, **12**, Article 688254. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.688254>
- [46] Qian, Y., Yang, L., Chen, J., Zhou, C., Zong, N., Geng, Y., *et al.* (2024) SRGN Amplifies Microglia-Mediated Neuroinflammation and Exacerbates Ischemic Brain Injury. *Journal of Neuroinflammation*, **21**, Article No. 35. <https://doi.org/10.1186/s12974-024-03026-6>
- [47] Cho, F.S., Vainchtein, I.D., Voskobiyuk, Y., Morningstar, A.R., Aparicio, F., Higashikubo, B., *et al.* (2022) Enhancing GAT-3 in Thalamic Astrocytes Promotes Resilience to Brain Injury in Rodents. *Science Translational Medicine*, **14**, eabj4310. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.abj4310>
- [48] Dalakas, M.C., Alexopoulos, H. and Spaeth, P.J. (2020) Complement in Neurological Disorders and Emerging Complement-Targeted Therapeutics. *Nature Reviews Neurology*, **16**, 601-617. <https://doi.org/10.1038/s41582-020-0400-0>
- [49] Åkerlund, C.A.I., Holst, A., Bhattacharyay, S., Stocchetti, N., Steyerberg, E., Smielewski, P., *et al.* (2024) Clinical Descriptors of Disease Trajectories in Patients with Traumatic Brain Injury in the Intensive Care Unit (CENTER-TBI): A Multicentre Observational Cohort Study. *The Lancet Neurology*, **23**, 71-80. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(23\)00358-7](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(23)00358-7)
- [50] McCrea, M.A., Giacino, J.T., Barber, J., Temkin, N.R., Nelson, L.D., Levin, H.S., *et al.* (2021) Functional Outcomes over the First Year after Moderate to Severe Traumatic Brain Injury in the Prospective, Longitudinal TRACK-TBI Study. *JAMA Neurology*, **78**, 982-992. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2021.2043>
- [51] Piedade, G.S., Assumpcao de Monaco, B., Guest, J.D. and Cordeiro, J.G. (2023) Review of Spinal Cord Stimulation for Disorders of Consciousness. *Current Opinion in Neurology*, **36**, 507-515. <https://doi.org/10.1097/wco.0000000000001222>
- [52] Zhou, K., Wei, W., Yang, D., Zhang, H., Yang, W., Zhang, Y., *et al.* (2024) Dual Electrical Stimulation at Spinal-Muscular Interface Reconstructs Spinal Sensorimotor Circuits after Spinal Cord Injury. *Nature Communications*, **15**, Article No. 619. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44898-9>
- [53] Zhu, Z., Hu, X. and Mao, Y. (2024) Spinal Cord Electrical Stimulation for Severe Disturbance of Consciousness after Traumatic Brain Injury: A Case Report. *Heliyon*, **10**, e34913. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34913>
- [54] Qin, X., Chen, X., Yao, L., Lu, F., Liang, Z., He, J., *et al.* (2024) Differential Brain Activity in Patients with Disorders of Consciousness: A 3-Month rs-fMRI Study Using Amplitude of Low-Frequency Fluctuation. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article 1477596. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1477596>
- [55] Zhuang, Y., Yang, Y., Xu, L., Chen, X., Geng, X., Zhao, J., *et al.* (2022) Effects of Short-Term Spinal Cord Stimulation on Patients with Prolonged Disorder of Consciousness: A Pilot Study. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 1026221. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1026221>
- [56] Zhuang, Y., Ge, Q., Li, Q., Xu, L., Geng, X., Wang, R., *et al.* (2024) Combined Behavioral and EEG Evidence for the 70 Hz Frequency Selection of Short-Term Spinal Cord Stimulation in Disorders of Consciousness. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, **30**, e14388. <https://doi.org/10.1111/cns.14388>
- [57] Huang, W., Chen, Q., Liu, L., Tang, J., Zhou, H., Tang, Z., *et al.* (2023) Clinical Effect of Short-Term Spinal Cord Stimulation in the Treatment of Patients with Primary Brainstem Hemorrhage-Induced Disorders of Consciousness. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article 1124871. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1124871>
- [58] Lefaucheur, J., Moro, E., Shirota, Y., Ugawa, Y., Grippe, T., Chen, R., *et al.* (2024) Clinical Neurophysiology in the Treatment of Movement Disorders: IFCN Handbook Chapter. *Clinical Neurophysiology*, **164**, 57-99. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2024.05.007>
- [59] Vitello, M.M., Laureys, S., Thibaut, A. and Gosseries, O. (2025) Non-Pharmacologic Interventions in Disorders of

- Consciousness. *Handbook of Clinical Neurology*, **207**, 197-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13408-1.00007-5>
- [60] Hallett, M. (2007) Transcranial Magnetic Stimulation: A Primer. *Neuron*, **55**, 187-199. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.06.026>
- [61] Risbrough, V.B., Vaughn, M.N. and Friend, S.F. (2022) Role of Inflammation in Traumatic Brain Injury-Associated Risk for Neuropsychiatric Disorders: State of the Evidence and Where Do We Go from Here. *Biological Psychiatry*, **91**, 438-448. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2021.11.012>
- [62] Howlett, J.R., Nelson, L.D. and Stein, M.B. (2022) Mental Health Consequences of Traumatic Brain Injury. *Biological Psychiatry*, **91**, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2021.09.024>
- [63] Philip, N.S., Ramanathan, D., Gamboa, B., Brennan, M.C., Kozel, F.A., Lazzeroni, L., *et al.* (2023) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Depression and Posttraumatic Stress Disorder in Veterans with Mild Traumatic Brain Injury. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, **26**, 878-884. <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2022.11.015>
- [64] O'Reardon, J.P., Solvason, H.B., Janicak, P.G., Sampson, S., Isenberg, K.E., Nahas, Z., *et al.* (2007) Efficacy and Safety of Transcranial Magnetic Stimulation in the Acute Treatment of Major Depression: A Multisite Randomized Controlled Trial. *Biological Psychiatry*, **62**, 1208-1216. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2007.01.018>
- [65] McClintock, S.M., Reti, I.M., Carpenter, L.L., McDonald, W.M., Dubin, M., Taylor, S.F., *et al.* (2018) Consensus Recommendations for the Clinical Application of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) in the Treatment of Depression. *The Journal of Clinical Psychiatry*, **79**, 35-48. <https://doi.org/10.4088/jcp.16cs10905>
- [66] Kim, H. and Ho, J.S. (2022) Wireless Interfaces for Brain Neurotechnologies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **380**, Article ID: 20210020. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0020>
- [67] Niso, G., Romero, E., Moreau, J.T., Araujo, A. and Krol, L.R. (2023) Wireless EEG: A Survey of Systems and Studies. *NeuroImage*, **269**, Article ID: 119774. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119774>
- [68] Raso, M.G., Arcuri, F., Liperoti, S., Mercurio, L., Mauro, A., Cusato, F., *et al.* (2021) Telemonitoring of Patients with Chronic Traumatic Brain Injury: A Pilot Study. *Frontiers in Neurology*, **12**, Article 598777. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.598777>
- [69] Parkinson, M.E., Smith, R.M., Tanious, K., Curtis, F., Doherty, R., Colon, L., *et al.* (2024) Experiences with Home Monitoring Technology in Older Adults with Traumatic Brain Injury: A Qualitative Study. *BMC Geriatrics*, **24**, Article No. 796. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05397-0>
- [70] Del Giovane, M., Trender, W.R., Bălăeț, M., Mallas, E., Jolly, A.E., Bourke, N.J., *et al.* (2023) Computerised Cognitive Assessment in Patients with Traumatic Brain Injury: An Observational Study of Feasibility and Sensitivity Relative to Established Clinical Scales. *eClinicalMedicine*, **59**, Article ID: 101980. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.101980>