



电子、语音版

·综述·

神经外科机器人辅助治疗原发性脑干出血 应用进展

李云清, 洪新杰, 侯立军

海军军医大学第二附属医院神经外科, 上海 200003

摘要:原发性脑干出血(PBSH)是一种病死率及致残率极高的急危重症,由于脑干位置深,周围毗邻重要神经血管组织,传统手术治疗风险极大,治疗方案的选择一直存在争议。随着神经外科手术机器人技术的发展,其以精准、微创的优势,为PBSH的治疗提供了新的选择。该文综述了神经外科机器人辅助治疗PBSH的核心技术原理、临床应用现状、治疗效果及安全性,并探讨了影响疗效的关键因素,旨在为临床实践提供参考。

关键词:脑干出血;手术机器人;原发性脑出血;高血压

中图分类号:R743

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2026.01.013

Advances in the application of robot-assisted neurosurgery in treatment of primary brainstem hemorrhage

LI Yunqing, HONG Xinjie, HOU Lijun

Department of Neurosurgery, The Second Affiliated Hospital of Navy Medical University, Shanghai 200003, China

Corresponding author: HOU Lijun, Email:houlijun@smmu.edu.cn

Abstract: Primary brainstem hemorrhage (PBSH) is a life-threatening acute disease characterized by high mortality and disability rates, and due to the deep anatomical location of the brainstem and its proximity to critical neurovascular structures, traditional surgical interventions have significant risks, with controversies over the selection of treatment regimens. With the rapid development of surgical robot techniques in neurosurgery, its advantages of precision and noninvasiveness have provided new options for the treatment of PBSH. This article reviews the core technological principles of neurosurgical robots in the treatment of PBSH, as well as the current status of clinical application, therapeutic outcomes, and safety profiles, and it also discusses the key influencing factors for treatment outcome, in order to provide a reference for clinical practice.

Keywords: brainstem hemorrhage; surgical robot; primary intracerebral hemorrhage; hypertension

原发性脑干出血(primary brainstem hemorrhage, PBSH)是高血压脑出血最凶险的亚型,占有高血压脑出血的6%~10%^[1-3]。高血压合并细小动脉硬化是PBSH最主要的病因,其他病因包括动静脉畸形、海绵状血管瘤、颅内肿瘤、凝血功能障碍等。脑干出血起病急骤,患者常迅速出现昏迷、呼吸循环障碍、肢体瘫痪等严重症

状,病死率高达47%~80%^[4-5]。这不仅源于血肿的直接压迫效应,更与继发的脑干水肿、炎症反应及细胞凋亡等病理生理过程密切相关。在治疗选择上,对于出血量较小、病情相对稳定的患者,内科保守治疗仍是基础方案,包括严格控制血压、脱水降颅压及对症支持治疗。尽管保守治疗虽能稳定部分患者病情,却无法有效解除血肿

基金项目:示范性研究型病房开展的研究者发起的临床研究项目(2023YJBF-GG04);国家自然科学基金项目(NO.82471402)。

收稿日期:2025-09-21; **修回日期:**2025-11-02

作者简介:李云清(1990—),男,在读硕士研究生,主要从脑出血病变的研究。Email: czliyuning@163.com。

通信作者:侯立军(1968—),男,主任医师,博士生导师,主要从事颅脑创伤及脑血管病的研究。Email:houlijun@smmu.edu.cn。

的持续占位效应,病死率与致残率仍居高不下。当血肿量较大或病情进行性加重时,外科干预成为可能的选择。传统开颅血肿清除术虽能实现直视下操作,但由于手术对脑干这一重要功能区域有构成二次损伤的风险,术后并发症发生率高,使得其临床应用价值一直存在争议^[6]。立体定向穿刺引流术作为一种微创替代方案,通过定向穿刺技术在一定程度上可降低手术创伤,但其精准度受限于框架系统的固有弊端或无框架导航的潜在误差,很难应对术中脑组织移位这一常见问题^[7]。在“保守治疗效果有限”与“传统手术风险高”的双重因素下,临床需要不断探索能够兼顾精准、微创与安全的新技术途径。

近年来,神经外科手术机器人的快速发展为突破PBSH治疗瓶颈提供了新的技术方向,这一技术的基本理念在于将外科医生的丰富经验与机器的精准稳定完美结合,通过集成高精度机械臂、先进光学追踪与智能规划软件,实现了手术操作方式的巨大转变。机器人系统能够基于术前获取的多模态影像数据(包括CT、MRI及弥散张量成像等)进行精确的三维重建与可视化规划,手术医生可精心设计避开重要功能区的个体化手术路径。手术中

机械臂以其亚毫米级的定位精度和超强的稳定性,能够准确无误地按照预设路径完成穿刺操作,显著降低了传统手术中因手部震颤、视觉误差或疲劳因素导致的偏差风险。随着临床应用的不断深入,越来越多的研究证据证明了机器人辅助技术不仅在降低手术误差^[8]、缩短操作时间^[9]、提高生存率并减少脑积水的发生^[10]等方面表现突出,还在提高手术安全性^[11]、减少并发症及改善神经功能恢复方面具有明显优势^[12-14],机器人辅助技术不仅提升了血肿清除的精准度,更为多种创新治疗模式的整合提供了可能。通过机器人建立的精准通道,可实现溶栓药物或神经保护剂的局部靶向递送,甚至为干细胞治疗等再生医学技术提供了微创入路,推动PBSH治疗从单纯的“血肿清除”向“解剖减压与功能修复并重”的复合模式转变。本研究综述了近年来机器人辅助手术在PBSH治疗中的研究进展(图1),重点探讨其在安全性与有效性方面的最新临床研究、应用现状及潜在影响因素,并分析未来技术发展趋势及推广过程中面临的挑战,旨在为神经外科临床实践提供参考。

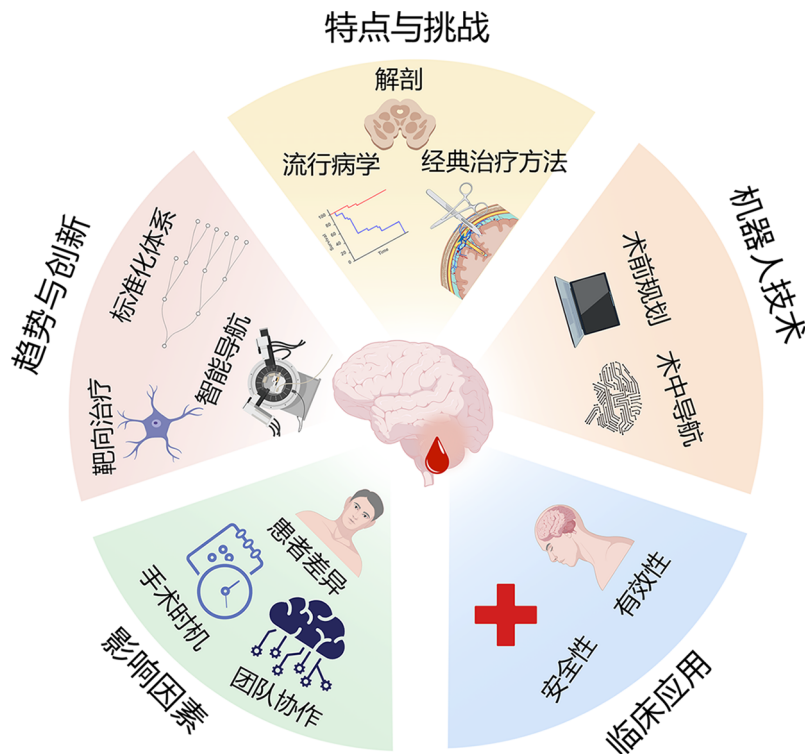


图1 神经外科机器人辅助治疗PBSH的应用进展

1 PBSH的特点与挑战

1.1 病因及解剖特点

高血压合并细小动脉硬化是PBSH的主要病因,长期高血压状态使得脑干穿支动脉血管壁发生玻璃样变性、纤维素样坏死,血管弹性降低,在血压突然升高时,薄弱

的血管壁易破裂出血。动静脉畸形时,血管结构异常,血流动力学改变,血管壁承受压力不均,容易破裂导致出血。海绵状血管瘤由众多薄壁血管组成,缺乏正常血管壁结构,也容易发生出血。颅内肿瘤侵犯脑干血管,或者凝血功能障碍导致凝血机制异常,均可增加PBSH的发病

风险^[15]。PBSH患者常突然起病,临床表现因出血部位和出血量的不同而有所差异。脑桥出血最为常见,少量出血(血肿 ≤ 5 mL)时,患者可表现为交叉性瘫痪和共济失调性偏瘫,两眼向病灶侧凝视麻痹或核间性眼肌麻痹;大量出血(血肿 > 5 mL)时,出血破入第四脑室,患者迅速出现昏迷、双侧针尖样瞳孔、呕吐咖啡样胃内容物、中枢性高

热、中枢性呼吸障碍、眼球浮动、四肢瘫痪和去大脑强直发作等症状^[16]。中脑出血病情较轻时,常有头痛、呕吐,病情较重时,表现为深昏迷,四肢迟缓性瘫痪等^[17]。延髓出血病情较轻时,可有共济失调、感觉障碍等表现,病情较重时,表现为突然意识障碍,影响呼吸、心率、血压等生命体征,可导致死亡(见表1)。

表1 PBSH各部位出血的临床特征

出血部位	临床表现	常见并发症	病死率	预后特点
中脑	动眼神经核受损导致眼球运动障碍、瞳孔异常;红核受损引起震颤、共济失调	眼肌麻痹、视物模糊、步态不稳,意识障碍通常较轻	相对较低(30%~40%)	相对最好,幸存者多遗留轻度残疾,如眼动问题、共济失调
脑桥	意识迅速丧失、双侧锥体束征(瘫痪)、针尖样瞳孔、中枢性高热、呼吸节律改变	呼吸衰竭(需机械通气)、神经源性肺水肿、应激性溃疡、中枢性高热、闭锁综合征	高(60%~80%),是脑干出血的主要类型和死因	预后差,幸存者中植物状态或严重残疾(闭锁综合征)比例高
延髓	直接影响心跳、呼吸、血压的延髓中枢,导致顽固性呃逆、吞咽困难、呼吸困难、循环衰竭	呼吸心跳骤停、恶性心律失常、吸入性肺炎(吞咽障碍)、循环衰竭	极高(70%~90%),病情进展迅猛	预后最差,即使存活,通常需终身依赖呼吸机,神经功能恢复极差

1.2 流行病学特点

PBSH作为脑血管疾病中最为危重的亚型,虽仅占有脑出血病例的6%~10%^[1-3],却因脑干这一生命中枢的解剖特性,致死率高达47%~80%^[4-5],构成巨大的疾病负担。其流行病学特征呈现地域与人群异质性,全球疾病负担研究显示,年龄标准化发病率在亚洲人群(尤其是东亚)中最高(约2~4/10万人年)^[18-19],这种差异与高血压患病率、食盐摄入量及医疗可及性等因素密切相关^[20]。近年来,随着全球人口老龄化进程加速及高血压、糖尿病等代谢性危险因素的流行,PBSH的发病人数呈现持续上升趋势,李共现等^[21]对1 268例脑出血患者进行详细分析,其中脑干出血的患者有46例,占总体样本的3.63%;官念等^[22]对1 124例患者的详细分析进一步证实其占6.58%,且发病年龄高度集中于50~70岁(约占60%),这与该年龄段动脉硬化及高血压控制不佳的病理基础直接相关,刘锦峰等^[23]共统计了1 203例高血压脑出血患者,其中脑干出血患者有42例,占总体样本的3.49%,在性别分布上,上述研究男性发病率普遍高于女性,可能与男性吸烟、饮酒及职业暴露等风险因素暴露率更高有关。

1.3 传统治疗方法及局限性

保守治疗主要包括卧床休息、控制血压、脱水降颅压、防治并发症等。对于出血量较少、病情相对稳定的PBSH患者,保守治疗可以通过积极控制血压,减少再出血风险;使用甘露醇、呋塞米等脱水药物减轻脑水肿,降低颅内压^[24]。但Hostettler等^[25]研究表明,保守治疗的患者病死率仍然较高,且神经功能恢复往往不理想。由于血肿持续压迫脑干组织,导致局部缺血、缺氧时间延长,

即使度过急性期,也可能遗留严重的神经功能障碍,如肢体瘫痪、吞咽困难、言语障碍等,严重影响患者的生活质量。一项纳入9项研究1 189例PBSH患者的Meta分析结果显示,保守治疗患者30 d病死率风险($RR: 0.57$; $95\%CI: 0.41 \sim 0.81$; $P: 0.002$; $I^2: 58\%$)、病死率($RR: 0.56$; $95\%CI: 0.41 \sim 0.75$; $P: 0.000$; $I^2: 54\%$)、90 d改良Rankin量表(modified Rankin Scale, mRS)($RR: 0.83$; $95\%CI: 0.73 \sim 0.93$; $P: 0.001$; $I^2: 0$)均高于立体定向抽吸术组^[26]。相较于保守治疗,立体定向抽吸术则具有更好的治疗效果,可以降低病死率和改善患者功能恢复。

传统手术治疗PBSH主要包括开颅血肿清除术和立体定向穿刺引流术。开颅血肿清除术能够直接暴露血肿,在直视下清除血肿,但由于脑干位置深在,手术需切开较大范围的脑组织,对周围正常组织损伤大,术中出血风险高^[27],容易损伤脑干周围重要的神经、血管结构,导致严重的并发症,如呼吸循环衰竭、肢体瘫痪加重等,增加手术病死率和病残率^[28]。立体定向穿刺引流术按定位方式分为有框架和无框架两类,有框架作为经典术式,定位精度极高,是深部小病灶穿刺的“金标准”,但缺点在于头架安装增加创伤和耗时,手术规划也不够灵活,无框架则更便捷、灵活,患者体验更好。机器人辅助技术作为新一代无框架技术,通过高精度机械臂和自动注册,有望达到甚至超过有框架的精度,同时保留无框架的便利性^[29-30]。在血肿清除策略上,笔者主张采取“术中少量抽吸减压,术后辅以尿激酶溶解残余血肿”的阶梯式微创方案。脑干作为功能密集区,过度机械抽吸或冲洗易引起周围核团和传导束的“二次损伤”,这可能是部分患者术

后长期植物生存或神经功能严重受损的重要原因。阶梯策略的核心在于“减压”而非“清空”,及时缓解压迫的同时最大程度保护神经结构完整性,为功能恢复奠定基础^[31]。

2 神经外科手术机器人技术

2.1 机器人的类型

目前,临床上应用于脑干出血治疗的机器人主要有法国 Medtech 公司研发的 ROSA 机器人、国产的华志 CAS-R-2 机器人、睿米手术机器人等。ROSA 机器人在国际上应用较为广泛,其具备多种功能模块,可用于神经外科多种疾病的手术治疗,在脑干出血治疗中,能够精准执行穿刺操作^[32],为临床医生提供有力支持。华志 CAS-R-2 机器人是我国自主研发的神经外科手术机器人,在国内多家医院得到应用,通过精准定位和规划,成功帮助众多 PBSH 患者清除血肿。睿米手术机器人则具有智能规划穿刺路径、定位精度达 0.5 mm 的优势,在脑干手术中具有操作更安全、高效的特点^[33]。不同类型机器人在临床应用中各有特点,但都旨在提高手术的精准性和安全性,改善患者预后。

2.2 术前规划与术中导航

神经外科手术机器人系统主要由机械臂、光学定位系统、手术规划软件等部分组成。术前,通过对患者进行头颅 CT 或 MRI 扫描,获取影像数据并导入手术规划软件,软件利用三维重建技术对脑干及血肿进行精确建模,医生在模型上规划最佳的穿刺路径和靶点。术中,光学定位系统实时追踪患者头部和机械臂的位置,确保机械臂按照预设路径准确运动,将穿刺针或手术器械精准送达血肿部位。如 ROSA 机器人系统利用红外线光学定位技术,定位精度可达亚毫米级^[27];国产的华志 CAS-R-2 机器人则通过机械臂的高精度运动控制,实现对手术路径的精确执行^[28]。甄雪克等^[32]针对 12 例行颅骨或脑内微小病灶及功能区病灶切除患者采取国产睿米手术机器人进行定位,结果显示,所有患者注册误差仅为(0.90±0.12)mm,机械臂注册误差为 0.09~0.12 mm。计划骨瓣中心与实际骨瓣中心的偏移误差仅(1.9±1.1)mm,均在正常误差范围内,且接近最低误差。由此看出,国产睿米手术机器人可为颅骨或脑内微小病灶行切除术患者提供术前精准定位,可以有效提高手术成功率以及安全性。

机器人辅助手术能够实现脑干血肿的精准定位,与传统手术相比,其定位误差降低。Gong 等^[21]通过对比机器人辅助立体定向穿刺与传统徒手立体定向穿刺治疗脑出血的效果,结果显示,机器人辅助立体定向穿刺组手术时间较传统穿刺组缩短($P=0.00$),术中引流量和血肿清除率较传统穿刺提高($P=0.00$),且并发症发生率(10%)也低于传统穿刺组(25%)。通过精准规划穿刺路径,能够有效避开脑干内重要的神经核团和血管,减少手术损伤。手术规划软件还能根据血肿的形态、大小和位置,为

不同患者制定个性化的手术方案,提高手术的针对性和有效性。同时,机器人导航大多依赖术前影像,术中因脑脊液流失、血肿引流、脱水药物使用或通气参数变化等原因,可能导致脑组织发生移位,即“脑漂移”现象,从而使术前规划的靶点与术中实际解剖位置产生偏差,可采取多种改进方法:术前将 CT 与 MRI 进行融合,规划路径时主动规避重要功能区,为可能的漂移提供“安全边界”^[34];在颅骨钻孔后,可使用术中超声进行实时扫描,直观显示血肿位置,并对穿刺路径进行最终确认和微调^[35];在具备条件的医疗中心,也可采用术中 CT 或 MRI 扫描,获取更新后的影像数据并与机器人系统进行重新配准,这是解决脑漂移最直接有效的方法,尽管会增加时间和成本。

3 机器人辅助治疗的临床应用

机器人辅助治疗 PBSH 在临床应用中展现出显著的临床疗效(见表 2),其通过微创穿刺方式精准清除血肿,有效减少术中出血及术后脑水肿,提高患者生存率,并改善神经功能预后,同时凭借机械臂的稳定性和光学定位的实时监控,最大限度降低穿刺偏差及手术相关并发症风险,为脑干出血这一高难度手术提供了更为可靠的治疗选择(图 2)。

3.1 机器人辅助治疗的有效性

机器人辅助下的脑干出血手术采用微创穿刺方式,穿刺针直径较小,对周围脑组织的损伤小于传统开颅手术。Sun 等^[33]研究表明,机器人辅助手术的术中出血量明显减少,术后脑水肿程度较轻。一项纳入 36 例机器人辅助治疗 PBSH 患者和 46 例保守治疗患者的对照研究显示,发病后 60 d,手术组和保守组的病死率分别为 19.44%、50.00%($P<0.05$)。此外,手术组术后格拉斯哥预后评分(Glasgow outcome scale, GOS)和格拉斯哥昏迷评分(Glasgow coma score, GCS)高于保守组,脑积水发生率低于保守组^[36]。由此看出机器人辅助 PBSH 引流可以提高患者存活率,减少脑积水的发生。

Chen 等^[11]提出了一种适用于 PBSH 的装载微~纳米器件的微创血肿清除机器人系统,并验证该新型系统可以利用人工智能技术快速重建大脑区域和重要血管,规划最佳穿刺路径,并通过微~纳米设备有效输送 rt-PA/MSCs,以减少残余脑内血肿并促进神经损伤修复,从而改善 PBSH 患者的生存率和功能预后。另一项多中心研究纳入 18 例高血压性脑干出血行机器人立体定向手术辅助系统辅助下行血肿穿刺联合侧脑室外引流术患者,术后 3 个月的随访结果表明,存活的 13 例患者无 1 例出现再出血,GOS 较术前提高^[37]。以上研究均表明,机器人辅助治疗 PBSH 在血肿清除、改善神经功能及提高生存率方面具有显著优势。

3.2 机器人辅助治疗的安全性

手术机器人的机械臂具有良好的稳定性和重复性,

表2 神经外科机器人辅助PBSh临床研究总结

作者	发表时间	病例数 / 例	疾病	结果	结论
许峰, 等 ^[30]	2017年	33	高血压性脑干出血	ROSA辅助组血肿清除率高于框架辅助组,手术时间与术后拔管时间均少于框架辅助组;框架辅助组术后再出血3例、颅内感染2例,ROSA辅助组无再出血和颅内感染	ROSA辅助微创手术治疗高血压性脑干出血在血肿清除率、手术时间、术后拔管时间等方面,均优于框架立体定向辅助治疗。其适用于高血压性脑干出血的超早期治疗
张秀峰, 等 ^[37]	2021年	18	高血压性脑干出血	所有患者顺利完成手术,无穿刺路径出血或颅内感染;术后3个月GOS:IV级3例、III级6例、II级4例、I级5例;死亡组入院GCS更低、术前血肿量更多	ROSA机器人辅助血肿穿刺联合侧脑室外引流术可精准有效清除血肿,并发症少;入院GCS低和血肿量较多的患者病死率更高
刘云阳, 等 ^[8]	2023年	40	脑干出血	术后血肿清除:即刻大部分清除7例,72 h内12例,3~7 d内14例,1~4周内7例;所有患者术后7 d内拔管,无再出血;术后6个月死亡13例(32.5%),存活27例中意识改善17例	机器人辅助立体定向穿刺抽吸技术有助于提高脑干出血患者的生存率,并为持续昏迷患者促醒治疗打下基础
Xu, 等 ^[14]	2023年	39	原发性脑桥出血	手术组平均GCS和GOS更高,病死率更低;对于血肿体积5~10 mL或GCS 6~8分的患者,手术组GOS更高	机器人无框架立体定向抽吸溶栓是安全有效的方法,血肿体积5~10 mL或GCS 6~8分的患者可能从手术中受益
Zhang, 等 ^[41]	2023年	53	PBSH	所有引流管准确放置,血肿平均减少3.7 mL,无严重手术相关并发症;手术组病死率28.6%vs对照组36.0%,良好预后率28.6%vs20.0%;血肿体积5~10 mL亚组预后更好	机器人辅助穿刺引流安全、可行、有效,尤其适合血肿体积5~10 mL的患者;血肿体积>10 mL可能与术后预后不良相关;需更高质量研究验证
孟宪兵, 等 ^[40]	2024年	11	PBSH	机械臂注射误差平均0.08 mm,手术时间平均67.0 min,术后残余血肿平均3.41 mL。术后30 d存活7例,死亡4例;术后90 d mRS评分5分5例,4分2例。无穿刺出血或手术相关感染	机器人辅助穿刺抽吸治疗PBSH安全可行,为精准治疗PBSH提供新思路
李世杰, 等 ^[29]	2024年	60	脑干出血	机器人组手术时间缩短,再出血发生率,穿刺准确率较高	机器人导航下穿刺引流术与立体定向框架辅助一样安全有效,但机器人导航可缩短手术时间,无框架阻挡,入路更方便,是更好选择,值得进一步推广
Bao, 等 ^[10]	2024年	82	PBSH	机器人组60 d病死率低于保守组;术后GCS和GOS高于保守组;脑积水发生率更低	机器人辅助PBSH引流可提高生存率、降低脑积水发生率,是一种安全有效的治疗选择
Tang, 等 ^[42]	2024年	125	自发性高血压脑干出血	机器人组6个月病死率低于保守组;良好预后率更高;初始GCS、血肿体积、出血部位是预后影响因素	机器人辅助引流可降低病死率和改善预后,手术应在选择病例中进行;初始GCS、血肿体积和部位是重要预后因素
Sun, 等 ^[33]	2025年	138	重度脑干出血	机器人组病死率低于保守组;出院时血肿体积更小;住院时间和费用更高;颅内感染和肺部感染率更高	机器人辅助穿刺可降低病死率并改善血肿清除,但住院时间和费用更高,感染风险增加,需权衡利弊

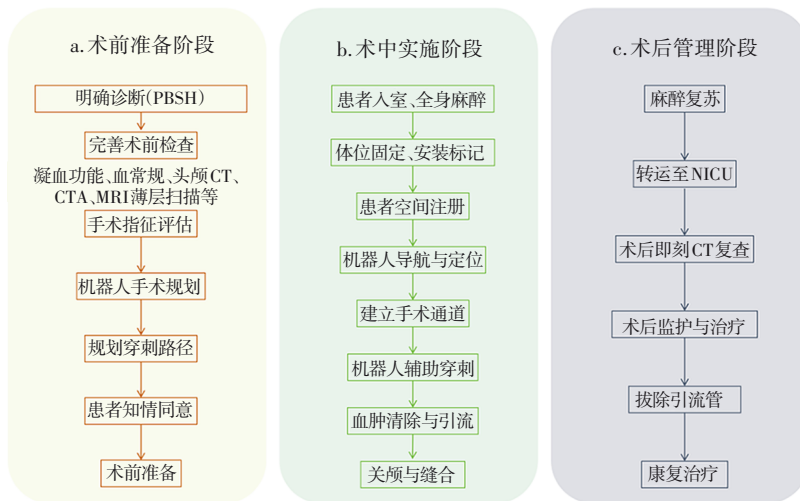


图2 神经外科机器人辅助治疗PBSh流程图

能够在术中保持精准的操作,避免因人为因素导致的穿刺偏差^[38]。在穿刺过程中,机械臂可根据预设程序缓慢、稳定地推进,减少对周围组织的扰动。光学定位系统实时监测手术器械的位置,一旦出现偏差,可及时进行调整,确保手术安全进行。以上操作对于脑干出血这种对手术精度要求极高的手术尤为重要,可以极大程度提高手术的安全性和可靠性。

此外,机器人辅助治疗PBSH的并发症发生率相对较低^[39]。孟宪兵等^[40]通过回顾性分析11例接受机器人辅助穿刺抽吸治疗的PBSH患者临床资料并采用mRS评估神经功能恢复,研究结果显示,患者术后残余血肿量较术前降低 $[(3.41\pm 1.70)\text{mL vs } (7.79\pm 1.46)\text{mL}]$,5例患者90 d mRS评分为5分,且术后影像学证实引流管头端均位于血肿腔中央,无穿刺道出血或手术相关感染。由此得出,机器人辅助手术通过精准定位和微创操作,可以有效降低手术对周围组织的损伤,减少并发症发生风险,促进神经功能恢复,提高手术安全性。

4 机器人辅助治疗的影响因素

4.1 患者个体差异

患者的年龄、基础健康状况、出血部位及出血量等个体差异对机器人辅助治疗效果有重要影响。年龄较大、合并多种基础疾病(如高血压、糖尿病、心肺功能不全等)的PBSH患者,术后恢复能力相对较弱,预后较差。出血部位位于脑干重要功能区,如延髓呼吸中枢附近,即使手术成功清除血肿,也可能因术前脑干损伤严重,导致患者呼吸、循环功能难以恢复。出血量较大的患者,血肿对周围组织的压迫和破坏更为严重,神经功能恢复的难度也相应增加。研究表明,机器人辅助治疗PBSH患者的预后与患者年龄相关,其中老年患者病死率高于年轻患者^[41]。

4.2 手术时机选择

一般认为,在患者病情允许的情况下,早期手术能够及时解除血肿对脑干的压迫,减少神经功能损伤,改善预后。然而,过早手术可能因患者生命体征不稳定,增加手术风险;过晚手术则可能导致血肿周围脑组织不可逆损伤。目前,对于最佳手术时机尚无统一标准,多数学者认为在发病后6~24 h内进行手术较为合适,但具体还需根据患者的实际情况综合判断。如研究得出某些患者在发病6 h内接受手术,预后较好,提示手术时机对脑干出血患者预后可能有重要影响,但未对比6~24 h与24 h后手术的情况^[42-43]。

4.3 机器人操作及团队协作

机器人操作的熟练程度以及多学科团队之间的协作能力也会影响治疗效果。术者对机器人系统的熟悉程度和操作经验直接关系到手术的精准性和效率。经验丰富的术者能够更快速、准确地完成手术规划和操作,减少手术时间和并发症的发生^[44]。机器人辅助治疗PBSH同样需要神经外科、影像科、麻醉科等多学科团队的密切协

作,影像科医生准确的影像诊断和图像数据处理,为手术规划提供重要依据;麻醉科医生维持患者术中生命体征平稳,保障手术安全进行^[45]。任何环节出现问题,都可能影响手术效果,所以必须建立严格的标准化操作流程,加强各科室间的紧密协作。术者在规划时必须结合原始二维影像逐层复核三维模型,确保无误。对于计划开展此类技术的基层医院,笔者建议可以由基层医院完成影像采集和手术操作,而将影像数据上传云端,由经验丰富的专家团队进行远程手术规划审核或指导,这样能最大程度地降低基层医院因经验不足导致的规划风险。有研究对不同手术团队机器人辅助治疗PBSH的效果进行比较^[13],发现操作熟练、团队协作良好的团队,其手术时间更短,术后并发症发生率更低,患者预后更好。

5 研究趋势与创新方向

5.1 智能导航与实时影像融合技术

智能导航与实时影像融合技术的进步为神经外科机器人辅助手术提供了更高的精度和实时反馈能力。以ROSA机器人为代表的辅助系统能够利用术前CT等影像资料精确定位脑干出血区域,实现高度精准的穿刺引流操作,显著降低了误伤风险并提高了手术效果^[33]。该系统通过红外光学追踪与机械臂的协同控制,可将术前影像坐标与术中实际解剖位置进行精确匹配,定位误差控制在1 mm以内,这对脑干这一功能密集区的手术至关重要。在术中,机器人辅助系统不仅能准确引导穿刺针抵达血肿核心,还能通过力反馈机制实时监测穿刺阻力变化,为术者提供重要的触觉信息,避免穿透过深或损伤血管。未来技术的发展将更加注重多模态信息的整合与应用,集成3D导航和激光辅助等技术的应用,可以实现更全面的实时术中环境感知与导航,提高手术的安全性和成功率。3D导航系统能够基于术前MRI和CT数据构建精确的脑干及血肿三维模型,并在术中实时显示穿刺器械与模型的相对位置关系^[46]。激光辅助技术能够通过激光扫描获取术野的高精度三维点云数据,与术前影像进行实时配准,从而有效补偿因脑脊液流失或组织牵拉导致的脑漂移现象^[47]。

5.2 精准术式与靶向生物治疗的有机结合

精准术式与靶向生物治疗的结合正成为脑干出血治疗领域的重要发展方向。传统手术方式主要着眼于血肿的机械性清除,虽能迅速降低颅内压,但对出血后继发的复杂病理生理过程干预有限,血肿及其降解产物会触发炎症反应、氧化应激、细胞凋亡等一系列级联反应,这些过程共同导致继发性脑损伤。因此,仅靠物理清除血肿难以实现理想的神经功能恢复。将生物标志物和分子靶点纳入治疗策略,能够实现对上述病理机制的精准干预,能有效改善患者预后^[48],机器人辅助系统以其高定位精度和稳定的操作能力,为局部靶向给药发挥了关键作用。

5.3 临床标准化体系的构建

临床标准化体系的构建是推动机器人辅助脑干出血手术从技术创新走向临床普及的关键环节。尽管 Tang 等^[42]研究显示机器人辅助治疗在降低病死率、改善神经功能评分(如 GCS、GOS)等方面展现出优于传统保守治疗的潜力,但其广泛应用仍面临 2 个核心问题,一是设备及维护成本较高,基层医院难以普及;二是疗效评价标准尚未统一,不同中心采用的手术成功率、并发症定义及功能评估标准存在差异,导致研究间难以直接比较和进行有效的荟萃分析。制定基于循证医学的机器人辅助脑干出血治疗临床指南和操作规范,是确保技术规范应用和推广前提,指南的制定应充分吸纳研究的成果,明确界定手术适应证、禁忌证、标准化操作流程以及质量控制指标^[49]。操作规范则应详细规定从术前设备检查、患者注册到术后验证的每一步骤,建立统一的并发症定义,减少不同医院、不同术者之间的技术差异,确保患者在各级医疗中心都能接受符合标准的高质量手术,最终推动这一创新技术安全、规范地惠及更多患者。

6 结论与展望

机器人辅助治疗脑干出血凭借其精准定位、微创操作、提高手术安全性与稳定性等优势,为脑干出血的治疗提供了新的手段。研究表明,机器人辅助治疗在血肿清除、改善神经功能及提高生存率方面取得了较好的效果,且并发症发生率相对较低,临床疗效的有效性和安全性得到验证。然而,受患者个体差异、手术时机选择以及机器人操作和团队协作等因素影响,治疗效果存在一定差异。机器人辅助治疗 PBSH 的发展将不仅限于硬件精度的提升,更在于与多模态影像、人工智能和远程医疗的深度融合。通过规划最优穿刺路径、预测并补偿脑漂移,以及构建全国性或区域性的远程手术规划与质控网络,将有望进一步降低手术风险,推动该技术在下级医院的安全、规范应用,最终惠及更多患者,为患者带来生存希望和更好的预后。

参 考 文 献

- [1] JOSEPHSON SA. JAMA Neurology-the year in review, 2020[J]. JAMA Neurol, 2021, 78(5): 521-522.
- [2] WANG SS, YANG Y, VELZ J, et al. Management of brainstem haemorrhages[J]. Swiss Med Wkly, 2019, 149: w20062.
- [3] GREENBERG SM, ZIAI WC, CORDONNIER C, et al. 2022 guideline for the management of patients with spontaneous intracerebral hemorrhage: a guideline from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. Stroke, 2022, 53(7): e282-e361.
- [4] FALLENIUS M, SKRIFVARS MB, REINIKAINEN M, et al. Spontaneous intracerebral hemorrhage[J]. Stroke, 2019, 50(9): 2336-2343.
- [5] ZHOU JY, WANG R, MAO JZ, et al. Prognostic models for survival and consciousness in patients with primary brainstem hemorrhage[J]. Front Neurol, 2023, 14: 1126585.
- [6] KEARNS KN, CHEN CJ, TVRDIK P, et al. Outcomes of surgery for brainstem cavernous malformations: a systematic review[J]. Stroke, 2019, 50(10): 2964-2966.
- [7] 朱习会, 王刘帅, 韩新旺. 开颅血肿清除术与神经导航引导下无框架立体定向穿刺引流治疗重症脑干出血的临床效果比较[J]. 中国医药, 2025, 20(9): 1324-1327.
- [8] 刘云阳, 王修玉, 张丙杰, 等. 机器人辅助立体定向穿刺抽吸治疗脑干出血的疗效分析[J]. 中华神经外科杂志, 2023, 39(9): 899-902.
- [9] GUPTA M, CHAN TM, SANTIAGO-DIEPPA DR, et al. Robot-assisted stereotactic biopsy of pediatric brainstem and thalamic lesions[J]. J Neurosurg Pediatr, 2021, 27(3): 317-324.
- [10] BAO DJ, NI SY, CHANG BW, et al. Short-term outcomes of robot-assisted minimally invasive surgery for brainstem hemorrhage: a case-control study[J]. Heliyon, 2024, 10(4): e25912.
- [11] CHEN DY, ZHANG P, TANG ZP. Micro ~ nanodevice-loaded minimally invasive robot for hematoma evacuation: a novel technology for primary brainstem hemorrhage treatment[J]. Innovation (Camb), 2024, 5(6): 100712.
- [12] WANG Y, JIN H, GONG S, et al. Efficacy analysis of robot-assisted minimally invasive surgery for small-volume spontaneous thalamic hemorrhage[J]. World Neurosurg, 2019, 131: e543-e549.
- [13] 中华医学会神经外科分会功能神经外科学组, 中国医师协会神经外科医师分会功能神经外科专业委员会. 神经外科手术机器人辅助原发性脑干出血穿刺引流术专家共识(2025版)[J]. 中华神经医学杂志, 2025, 24(4): 325-334.
- [14] XU CX, HE WB, YI T, et al. Robotic frameless stereotactic aspiration with thrombolysis for primary pontine hemorrhage: a therapeutic evaluation of a retrospective cohort study[J]. J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg, 2025, 86(2): 111-119.
- [15] ALMOHAMMEDI RM, ALMUTAIRI H, ALHOUSSEIN RO, et al. Brainstem hemorrhage is uncommon and is associated with high morbidity, mortality, and prolonged hospitalization[J]. Neurosciences (Riyadh), 2020, 25(2): 91-96.
- [16] OSTROWSKI RP, HE ZH, PUCKO EB, et al. Hemorrhage in brain tumor-an unresolved issue[J]. Brain Hemorrhages, 2022, 3(2): 98-102.
- [17] 秦庚, 牛光明. 原发性脑干出血的手术治疗研究进展[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2023, 50(4): 61-64.
- [18] JANG JH, SONG YG, KIM YZ. Predictors of 30-day mortality and 90-day functional recovery after primary pontine hemorrhage[J]. J Korean Med Sci, 2011, 26(1): 100-107.
- [19] WESSELS T, MÖLLER-HARTMANN W, NOTH J, et al. CT findings and clinical features as markers for patient outcome in primary pontine hemorrhage[J]. Am J Neuroradiol, 2004, 25(2): 257-260.
- [20] 《中国卒中中心报告 2022》编写组. 《中国卒中中心报告

- 2022)概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2024, 21(8): 565-576.
- [21] 李共现. 1 268 例急性脑出血统计分析[J]. 河南实用神经疾病杂志, 2004, 7(2): 44-45.
- [22] 官念, 吴碧华, 刘万平, 等. 南充地区 1 124 例脑出血患者病因学研究[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2016, 18(12): 1315-1317.
- [23] 刘锦峰, 王振江, 马晓鹏. 脑出血 1 203 例临床流行病学分析[J]. 实用心脑血管病杂志, 2007, 15(9): 684-685.
- [24] LIU LP, LI ZX, ZHOU HY, et al. Chinese stroke association guidelines for clinical management of ischaemic cerebrovascular diseases: executive summary and 2023 update[J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2023, 8(6): e3.
- [25] HOSTETTLER IC, SEIFFGE DJ, WERRING DJ. Intracerebral hemorrhage: an update on diagnosis and treatment[J]. *Expert Rev Neurother*, 2019, 19(7): 679-694.
- [26] PUSTILNIK HN, FONTES JHM, PORTO JUNIOR S, et al. Stereotactic aspiration versus conservative management for primary brainstem hemorrhage: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2024, 246: 108583.
- [27] LI Y, YANG SY, ZHOU XB, et al. A retrospective cohort study of neuroendoscopic surgery versus traditional craniotomy on surgical success rate, postoperative complications, and prognosis in patients with acute intracerebral hemorrhage[J]. *Comput Intell Neurosci*, 2022, 2022: 2650795.
- [28] CHEN DY, TANG YX, NIE H, et al. Primary brainstem hemorrhage: a review of prognostic factors and surgical management[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 727962.
- [29] 李世杰, 韩斌, 金丹, 等. 机器人导航与传统立体定向治疗脑干出血的疗效对比[J]. 立体定向和功能性神经外科杂志, 2024, 37(6): 346-350.
- [30] 许峰, 陶英群, 孙霄, 等. ROSA 辅助定向手术治疗高血压性脑干出血[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2017, 22(2): 54-56.
- [31] WANG T, ZHAO QJ, GU JW, et al. Neurosurgery medical robot remebot for the treatment of 17 patients with hypertensive intracerebral hemorrhage[J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15(5): e2024.
- [32] 甄雪克, 邵旭, 田宏, 等. 国产手术机器人在颅脑微小病灶及功能区病灶精准切除手术中的应用[J]. 中华神经医学杂志, 2022, 21(10): 1030-1033.
- [33] SUN XW, ZHU JH, LU M, et al. Robot-assisted puncture versus conservative treatment for severe brainstem hemorrhage: clinical outcomes comparison with experience of 138 cases in a single medical center[J]. *World J Emerg Surg*, 2025, 20(1): 15.
- [34] SENOVA S, LEFAUCHEUR JP, BRUGIÈRES P, et al. Case report: multimodal functional and structural evaluation combining pre-operative nTMS mapping and neuroimaging with intraoperative CT-scan and brain shift correction for brain tumor surgical resection[J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 646268.
- [35] WU K, BI WL, ESSAYED WI, et al. Integration of microanatomy, neuronavigation, dynamic neurophysiologic monitoring, and intraoperative multimodality imaging for the safe removal of an insular glioma: 2-dimensional operative video[J]. *Oper Neurosurg*, 2021, 21(1): E28-E29.
- [36] HU S, LU RJ, ZHU YL, et al. Application of medical image navigation technology in minimally invasive puncture robot[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(16): 7196.
- [37] 张秀峰, 李豪, 程刚, 等. 机器人辅助血肿穿刺联合侧脑室外引流术治疗高血压性脑干出血的应用分析[J]. 中华神经外科杂志, 2021, 37(9): 889-893.
- [38] ZHOU SY, GAO Y, LI RP, et al. Neurosurgical robots in China: state of the art and future prospect[J]. *iScience*, 2023, 26(11): 107983.
- [39] 倪升远, 钱中润, 张旺, 等. 神经外科手术机器人辅助原发性丘脑出血穿刺引流治疗的效果分析[J]. 临床神经外科杂志, 2023, 20(2): 130-134.
- [40] 孟宪兵, 于承淑, 谢方民, 等. Remebot 机器人辅助微创穿刺抽吸治疗原发性脑干出血的临床疗效分析[J]. 临床神经外科杂志, 2024, 21(5): 518-523, 528.
- [41] ZHANG S, CHEN T, HAN B, et al. A retrospective study of puncture and drainage for primary brainstem hemorrhage with the assistance of a surgical robot[J]. *Neurologist*, 2023, 28(2): 73-79.
- [42] RAJAGOPAL N, KAWASE T, MOHAMMAD AA, et al. Timing of surgery and surgical strategies in symptomatic brainstem cavernomas: review of the literature[J]. *Asian J Neurosurg*, 2019, 14(1): 15-27.
- [43] HAO GS, XU ZT, ZHU JX. Surgical treatment of spontaneous brainstem hemorrhage: a case report[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(51): e18430.
- [44] TANG ZJ, HUANG WL, CHEN QQ, et al. Curative effect analysis of robot-assisted drainage surgery in treatment of spontaneous hypertensive brainstem hemorrhage[J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1352949.
- [45] KEKHIA H, RIGOLO L, NORTON I, et al. Special surgical considerations for functional brain mapping[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2011, 22(2): 111-132.
- [46] WEI P, FU KM, VILLACRES J, et al. A compact handheld sensor package with sensor fusion for comprehensive and robust 3D mapping[J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(8): 2494.
- [47] 郭自强, 薛长理, 梁春东, 等. 激光辅助下经额穿刺治疗基底节脑出血[J]. 中华神经外科疾病研究杂志, 2024, 18(3): 15-18.
- [48] ZHANG PS, RAN YA, HAN L, et al. Nanomaterial technologies for precision diagnosis and treatment of brain hemorrhage[J]. *Biomaterials*, 2025, 321: 123269.
- [49] BLITZ R, STORCK M, BAUNE BT, et al. Design and implementation of an informatics infrastructure for standardized data acquisition, transfer, storage, and export in psychiatric clinical routine: feasibility study[J]. *JMIR Ment Health*, 2021, 8(6): e26681.

责任编辑:王荣兵