

机器学习在高血压脑出血预后预测中的应用与展望

何梦辉¹ 卢忠胜² (通讯作者)

1.青海大学 青海 西宁 810016

2.青海省人民医院 青海 西宁 810007

【摘要】：高血压脑出血属于神经外科常见的急危重症，有着高致残率以及高病死率的特性，精准的预后评估是制定个体化治疗方案以及优化医疗资源分配的关键前提条件，本文是要为高血压脑出血患者预后预测的临床研究和实践给予参考，推动机器学习模型从科研工具朝着临床决策支持系统进行转化。

【关键词】：高血压脑出血；预后预测；机器学习；传统模型；研究进展

DOI:10.12417/2811-051X.26.04.008

引言

高血压脑出血（Hypertensive Intracerebral Hemorrhage, HICH）起病急骤、病情进展迅猛，其致死率与致残率长期处于高位^[1]。那些存活下来的患者大多会留下不同程度的神经功能缺损情况。因此，精准的预后评估是优化临床诊疗决策、合理分配医疗资源的关键。随着人工智能技术不断地更新换代，机器学习依靠它自身高效处理高维数据以及挖掘变量潜在关联的独特优势，在 HICH 的预后预测中，所呈现出来的预测效能要比传统方法更具优势^[2]。

本文综述 HICH 预后预测的研究进展，对比了传统方法与机器学习模型，剖析当前研究面临的核心挑战并展望未来发展方向，为 HICH 预后预测的临床研究与实践提供参考。

1 高血压脑出血概述

1.1 流行病学与临床表现

HICH 是长期高血压刺激导致脑内小动脉或微小动脉慢性病变并破裂引发的出血。全球范围内，脑出血（ICH）占有卒中病例的 10%~15%，高血压是其主要危险因素，占 ICH 病例的 50%~70%^[3]。HICH 的临床表现复杂多样，症状严重程度及具体表现主要取决于出血部位、出血量、是否破入脑室及患者全身状况^[4]。头痛为常见首发症状，出血量较大或破入脑室时，部分患者可迅速出现意识水平下降，表现为嗜睡至昏迷等不同程度障碍^[5]。患者局灶性神经功能缺损常表现为突发单侧肢体无力、麻木、口角歪斜或言语不清^[6]。随血肿扩大及周围脑水肿加重，还可出现恶心、呕吐、视乳头水肿等颅内压增高表现。快速识别其典型症状至关重要，同时需警惕以耳聋、癫痫或单纯认知下降为首发的不典型表现。

1.2 诊断

HICH 的诊断需结合病史、临床表现及影像学证据。头颅

CT 为急性期首选影像学检查，可快速精准显示出血部位、血肿体积、是否破入脑室、有无脑疝等关键信息，是急诊确诊的主要依据^[7]。若 CT 表现不典型，或患者年轻、无明确高血压史，需进一步完善 CTA、MRI 或 DSA 检查，以排除脑血管畸形、动脉瘤等血管病变。

1.3 治疗

HICH 的治疗的关键目标在于快速稳定病情、控制活动性出血以及预防疾病复发。急性期治疗重点在于抑制血肿扩大、降低继发性脑损伤风险，为后续治疗奠定基础^[8]。降压是急性期治疗的核心要点，急性高血压是血肿扩大的有力预测因素，并且和患者死亡率紧密相连^[9]。研究证实，对急重症 HICH 患者施行个体化降压方案，可提升 90 天预后的功能独立性^[10]。对于正在使用抗凝药物或者合并其他凝血疾病的患者，需要紧急改善凝血功能，这是阻止血肿扩大的关键干预手段^[11]。颅内出血之后，血肿释放的凝血酶、血红蛋白等会引发炎症反应、氧化应激，致使血肿周围脑水肿以及颅内压升高，严重影响患者预后^[12,13]。目前针对脑水肿与颅内压升高的常规干预措施包括抬高床头、应用甘露醇或高渗盐水等脱水降颅压药物。神经外科手术是 HICH 治疗的关键构成部分，主要有开颅血肿清除术、脑室外引流术以及微创血肿清除术，和传统开颅手术相比，微创血肿清除术正在多项临床试验中接受评估，有望成为未来改善患者预后的新方向^[14]。

2 高血压脑出血预后预测体系

2.1 预后核心影响因素

HICH 的预后受到多种复杂因素的调控，这些因素囊括了患者入院时的生理状态、血肿特征，还包括基础疾病、治疗干预策略以及遗传背景等。

作者声明，本文的研究、撰写及/或出版工作获得了资金支持。作者衷心感谢青海省科技厅重大科技专项计划项目（编号：2024-SF-A2）以及青海省“昆仑英才·科技领军人才”项目的资金支持。

年龄属于 HICH 患者预后的一项独立危险因素，多项研究已经证实，年龄的增长和不良预后存在明显关联^[15-17]。老年患者的神经功能修复能力相对比较薄弱，并且身体储备功能也有所下降，对于后续干预的耐受能力更差，另外老年患者更容易出现肺部感染、应激性溃疡、颅内再出血等并发症^[18]。

HICH 患者入院时常见血压 (BP) 升高与心率 (HR) 异常，多项研究已证实，这两项生命体征异常与患者疾病严重程度、血肿扩大风险及短期、长期预后密切相关^[19]。一项纳入 1416 例急性脑出血患者的研究显示，入院时血压、心率均升高的患者 1 年预后更差，其不良结局发生风险为对照组的 4 倍 (OR=4.379)^[20]。血压和心率的组合模式可能比单一指标提供更强的预后信息，这通常反映了更严重的自主神经功能紊乱。

在对 HICH 进行预后评估时，出血的具体部位可决定神经功能缺损所呈现的类型以及严重程度，而血肿体积是用来量化脑组织损伤程度以及死亡风险的核心指标。不同出血部位的患者，其预后有着明显差异，像基底节区、丘脑、脑干等深部脑组织发生出血的患者，预后相对比较差，脑叶出血的患者预后则更为理想^[21]。脑干是生命中枢，负责调控呼吸、循环等基本生命功能，丘脑是感觉运动传导通路的关键中继站，如果出血病灶侵犯了这些关键神经结构，患者的临床结局就会明显变差^[22]。另外血肿体积越大，对脑组织的占位效应以及继发性损伤就越明显^[23]。

高血糖 (含糖尿病性高血糖与急性应激性高血糖) 对 HICH 患者的预后具有明确影响。高血糖可加剧血肿周围脑水肿与脑细胞死亡，扩大脑组织损伤范围^[24]；同时还会损害脑血管调节功能、增加血管壁脆性，影响止血过程，最终导致血肿扩大或再出血^[25]。相关动物实验的 Meta 分析进一步证实，糖尿病或高血糖状态会增加脑出血后的血肿体积及血肿周围水肿程度^[26]。

2.2 传统预后预测方法与模型

机器学习技术应用于临床之前，HICH 预后预测主要依赖评分系统与传统统计模型，此类方法为临床预后评估提供了基础支撑，但存在显著局限性。

2.2.1 临床评分系统

评分系统是 HICH 临床最常用的预后评估工具，通过整合少量关键临床指标量化计分，具有操作简便、结果直观的优势。ICH 评分是专门针对急性非创伤性脑出血设计的临床分级量表，其作用是对患者病情严重程度以及预后情况作出评估，该量表主要纳入了年龄、GCS 评分、出血部位、血肿体积以及脑室出血等因素^[20]；GCS 评分是凭借对患者睁眼、语言以及肢体运动反应进行量化计分，可迅速判断患者的意识状态以及急性期预后^[27]；改良 Rankin 量表 (mRS 评分) 是一种被广泛应用于评估脑卒以及其他神经系统疾病患者残疾程度和功能

恢复情况的标准化工具，该工具可用于预后评估，还可用于病情进展的监测，不过评分系统所得到的结果会受到评估者主观判断的较大影响，很容易出现评估者之间评分存在差异的情况

2.2.2 传统临床预测模型

传统临床预测模型以统计学为基础，整合人口学特征、临床指标及病史等基础变量，通过逻辑回归 (Logistic Regression)、Cox 比例风险模型 (Cox Proportional Hazards Model) 等算法，来打造疾病诊断、风险分层以及预后评估的工具。然而它存在一定的局限性，指标覆盖范围比较有限，大多依赖少数关键指标，很难将影像数据、基因组数据等高维多类型数据整合进去，也难以有效捕捉指标之间复杂的非线性交互关系，导致预测精度受到限制^[28]。

2.3 基于机器学习的预后预测模型

2.3.1 机器学习在医学预后预测中的应用现状

近些年来人工智能技术发展迅速，机器学习作为它的核心分支，在医学领域的诸多方向都有广泛应用。Aurelian 等人^[29]借助机器学习技术构建深静脉血栓 (DVT) 预测模型，旨在提升 DVT 风险分层准确性，为临床决策提供数据驱动的支持。另有研究采用 XGBoost 模型，依据临床基线数据预测缺血性脑卒中患者住院期间的死亡风险，其预测效能 (AUC 值) 显著优于传统 Logistic 回归模型^[30]。上述应用实践证实，机器学习在医学预后预测方面有出色性能和广阔潜力，为其在 HICH 预后预测中的推广应用奠定了坚实基础。

2.3.2 常用机器学习算法类型及原理

随机森林 (Random Forest, RF) 作为一种集成学习算法，其核心在于构建多棵决策树，在分类任务中，采用投票法整合多棵树的预测结果，在回归任务里，则运用均值法来整合，输出最终的预测结论。在决策树构建阶段，借助随机抽样样本以及随机选择特征的方式，可有效地降低单棵决策树出现过拟合的风险，同时提升模型的稳定性与泛化能力。此模型可以高效地处理高维数据，还可自动对各特征的关键性进行量化，对于数据噪声以及缺失值有一定的鲁棒性，适用于多种预后指标的预测场景。

梯度提升树 (Gradient Boosting Machine, GBM) 系列算法包含 XGBoost、LightGBM、CatBoost 等，它们都属于集成学习算法，其核心原理是借助迭代训练多棵弱分类器，这里的弱分类器一般是决策树，每一轮训练都着重于沿着梯度下降的方向去纠正上一轮模型的预测误差，最后把多棵弱分类器的结果进行加权融合，输出最终的预测结论。GBM 系列算法在对特征信息的挖掘方面更加充分，预测精度也相对更优，不过在处理大规模数据的时候需要依靠参数调优来避免出现过拟合风险。

3 机器学习在高血压脑出血后预测中的研究现状

3.1 短期死亡率预测

短期死亡率是 HICH 预后评估的核心指标，相关预测研究开展最为广泛。这类研究的数据源主要是临床基线数据，有部分研究还纳入了影像组学数据或者短期时序监测数据。Mao 等人^[31]在多中心数据库里选取了 HICH 患者的临床基线数据，运用 XGBoost 算法构建了住院期间死亡率预测模型，该模型的 AUC 值为 0.86，并且经过外部验证证明其有良好的泛化能力。和传统统计模型以及评分系统相比，机器学习模型在 HICH 短期死亡率预测方面的效能更加优良。

3.2 血肿扩大预测

血肿扩大研究的数据源以影像组学数据为主，辅以临床基线数据^[32]。Li 等^[33]整合 CT 影像提取特征（如血肿形状、异质性、岛征、混合征）及人口统计学与临床特征，通过 XGBoost

模型预测 HICH 后 24 小时内血肿扩大，模型准确率达 0.82。机器学习模型在 HICH 血肿扩大预测中的性能已达较高水平。当前，机器学习在 HICH 预后预测中的应用主要集中于短期死亡率与血肿扩大预测，长期预后预测相关研究仍较匮乏，未来需将长期预后预测作为重点研究方向。

4 总结与展望

机器学习技术不断发展，为 HICH 预后预测给予了全新的技术途径以及工具支持，然而在这个领域依旧存在着许多挑战，医疗数据有复杂性和异质性，这使得数据采集、清洗以及标注的过程耗时间又花费精力，成本也较高。模型可解释性不足是另外一个关键的瓶颈问题，大多数机器学习模型都有“黑箱”特性，预测结果很难进行追溯和解释。未来研究需聚焦两大核心方向：一是开展前瞻性多中心验证，二是推进可解释人工智能技术的研发与应用，以此推动机器学习模型从研究工具向临床决策支持系统的实质性落地转化。

参考文献：

- [1] VAN VALBURG M K, TERMORSHUIZEN F, GEERTS B F, et al. Predicting 30-day mortality in intensive care unit patients with ischaemic stroke or intracerebral haemorrhage [J]. *European journal of anaesthesiology*, 2024, 41(2): 136-45.
- [2] MAINALI S, DARSIE M E, SMETANA K S. Machine Learning in Action: Stroke Diagnosis and Outcome Prediction [J]. *Frontiers in neurology*, 2021, 12: 734345.
- [3] KATANO H, NISHIKAWA Y, UCHIDA M, et al. Secular trends and features of thalamic hemorrhages compared with other hypertensive intracerebral hemorrhages: an 18-year single-center retrospective assessment [J]. *Frontiers in neurology*, 2023, 14: 1205091.
- [4] KASE C S, HANLEY D F. Intracerebral Hemorrhage: Advances in Emergency Care [J]. *Neurologic clinics*, 2021, 39(2): 405-18.
- [5] BRODERICK M, ROSIGNOLI L, LUNAGARIYA A, et al. Hypertension is a Leading Cause of Nontraumatic Intracerebral Hemorrhage in Young Adults [J]. *Journal of stroke and cerebrovascular diseases : the official journal of National Stroke Association*, 2020, 29(5): 104719.
- [6] PURRUCKER J C, STEINER T. [Atypical intracerebral hemorrhage-etiology and acute management] [J]. *Der Nervenarzt*, 2019, 90(4): 423-41.
- [7] JIMÉNEZ-RUIZ A, BECERRA-AGUIAR N N, AGUILAR-FUENTES V, et al. Expanding Diagnostic Workup for hypertensive Intracerebral hemorrhage: a retrospective LATAM cerebrovascular registry comparison [J]. *Revista de investigacion clinica; organo del Hospital de Enfermedades de la Nutricion*, 2024, 76(5): 213-22.
- [8] KLAIVANSKY D, DAVIS N, LAY C. Emergency department management of acute intracerebral hemorrhage [J]. *Emergency medicine practice*, 2023, 25(Suppl 7): 1-41.
- [9] HALLER J T, WISS A L, MAY C C, et al. Acute Management of Hypertension Following Intracerebral Hemorrhage [J]. *Critical care nursing quarterly*, 2019, 42(2): 129-47.
- [10] ZHAO J, YUAN F, FU F, et al. Hypertension management in elderly with severe intracerebral hemorrhage [J]. *Annals of clinical and translational neurology*, 2021, 8(10): 2059-69.
- [11] SCHRAG M, KIRSHNER H. Management of Intracerebral Hemorrhage: JACC Focus Seminar [J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2020, 75(15): 1819-31.
- [12] MAGID-BERNSTEIN J, GIRARD R, POLSTER S, et al. Cerebral Hemorrhage: Pathophysiology, Treatment, and Future Directions [J]. *Circulation research*, 2022, 130(8): 1204-29.
- [13] WAN Y, HOLSTE K G, HUA Y, et al. Brain edema formation and therapy after intracerebral hemorrhage [J]. *Neurobiology of disease*,

2023, 176: 105948.

- [14] KIRSHNER H, SCHRAG M. Management of Intracerebral Hemorrhage: Update and Future Therapies [J]. *Current neurology and neuroscience reports*, 2021, 21(10): 57.
- [15] DING W, GU Z, SONG D, et al. Development and validation of the hypertensive intracerebral hemorrhage prognosis models [J]. *Medicine*, 2018, 97(39): e12446.
- [16] ZHU Z Y, HAO L F, GAO L C, et al. Determinants of acute and subacute case-fatality in elderly patients with hypertensive intracerebral hemorrhage [J]. *Heliyon*, 2023, 9(10): e20781.
- [17] WANG S, WANG R, LI X, et al. A nomogram based on systemic inflammation response index and clinical risk factors for prediction of short-term prognosis of very elderly patients with hypertensive intracerebral hemorrhage [J]. *Frontiers in medicine*, 2025, 12: 1535443.
- [18] XIA Y, WANG R. Effect and prognosis of endoscopic intracranial hematoma removal and hematoma puncture and drainage in patients with hypertensive intracerebral hemorrhage [J]. *Wideochirurgia i inne techniki maloinwazyjne = Videosurgery and other miniinvasive techniques*, 2024, 19(2): 266-73.
- [19] QIU M, SATO S, ZHENG D, et al. Admission Heart Rate Predicts Poor Outcomes in Acute Intracerebral Hemorrhage: The Intensive Blood Pressure Reduction in Acute Cerebral Hemorrhage Trial Studies [J]. *Stroke*, 2016, 47(6): 1479-85.
- [20] WANG D, JIANG R, KANG K, et al. Association of severity and prognosis with elevated blood pressure and heart rate levels in patients with intracerebral hemorrhage [J]. *BMC neurology*, 2023, 23(1): 361.
- [21] ZHANG J, ZHANG N, LI X, et al. Retrospective analysis of prognostic factors in HICH patients after neuroendoscopic hematoma evacuation [J]. *Scientific reports*, 2024, 14(1): 29505.
- [22] SREEKRISHNAN A, DEARBORN J L, GREER D M, et al. Intracerebral Hemorrhage Location and Functional Outcomes of Patients: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis [J]. *Neurocritical care*, 2016, 25(3): 384-91.
- [23] 王芙蓉.自发性大容积脑出血监测与治疗——中国专家共识[J].*中华脑血管病杂志(电子版)*,2021,15(06):431.
- [24] LIANG S, TIAN X, GAO F, et al. Prognostic significance of the stress hyperglycemia ratio and admission blood glucose in diabetic and nondiabetic patients with spontaneous intracerebral hemorrhage [J]. *Diabetology & metabolic syndrome*, 2024, 16(1): 58.
- [25] GONG Y, WANG Y, CHEN D, et al. Predictive value of hyperglycemia on prognosis in spontaneous intracerebral hemorrhage patients [J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e14290.
- [26] 李思,王赛,张雨蓬,等.糖尿病/高血糖对脑出血预后的影响: 动物实验 meta 分析[J].*国际神经病学神经外科学杂志*,2022,49(03):59-65.
- [27] TEASDALE G, JENNETT B. Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale [J]. *Lancet (London, England)*, 1974, 2(7872): 81-4.
- [28] WONGVIBULSIN S, WU K C, ZEGER S L. Clinical risk prediction with random forests for survival, longitudinal, and multivariate (RF-SLAM) data analysis [J]. *BMC medical research methodology*, 2019, 20(1): 1.
- [29] ANGHELE A D, MARINA V, DRAGOMIR L, et al. Predicting Deep Venous Thrombosis Using Artificial Intelligence: A Clinical Data Approach [J]. *Bioengineering (Basel, Switzerland)*, 2024, 11(11).
- [30] 王小曼,游一鸣,韩梦琦,等.基于机器学习模型对缺血性脑卒中住院期间死亡风险的预测[J].*现代预防医学*, 2024,51(19):3457-3462+3482.
- [31] MAO B, LING L, PAN Y, et al. Machine learning for the prediction of in-hospital mortality in patients with spontaneous intracerebral hemorrhage in intensive care unit [J]. *Scientific reports*, 2024, 14(1): 14195.
- [32] 蒋小兵.基于机器学习的高血压脑出血血肿扩大因素分析及应用[D].*西安医学院*,2021.
- [33] LI Y, DU C, GE S, et al. Hematoma expansion prediction based on SMOTE and XGBoost algorithm [J]. *BMC medical informatics and decision making*, 2024, 24(1): 172.