

论 著

CT影像组学预测重型颅脑损伤患者相关指数的临床研究*

陈贵平* 李 敏 田志华
申建波 崔 杰 段海峰
张 浩 茹小红

晋城市人民医院神经外科 (山西 晋城 048000)

【摘要】目的 本研究旨在探讨基于CT放射组学特征的机器学习模型在预测重型颅脑损伤(sTBI)患者压力振幅相关指数(RAP)中的应用价值。方法 对36例颅脑损伤患者的临床及影像资料进行回顾性分析。所有患者均接受手术治疗、持续的颅内压监测和有创性动脉压监测。术后1h内采集压力幅值相关指数(RAP)。从患者术后1h的颅脑CT图像中选取3个感兴趣体积(VOI)，每个VOI提取93个放射组学特征。建立了三个模型来评估患者的RAP水平。采用准确率、精确度、召回率、F1评分、受试者操作特征(ROC)曲线、曲线下面积(AUC)等指标评价各模型的预测效果。结果 3种RAP预测模型的最佳特征数分别为5个。对海马区模型的预测准确率为77.78%，准确率为88.24%，召回率为60%，F1得分为0.6，AUC为0.88。对脑干模型的预测准确率为63.64%，准确率为58.33%，召回率为60%，F1得分为0.54，AUC为0.82。对丘脑模型的预测准确率为81.82%，准确率为88.89%，召回率为75%，F1得分为0.77，AUC为0.96。结论 CT放射组学可以预测sTBI患者的RAP水平，有可能建立一种无创监测颅内压(NI-ICP)的方法。

【关键词】CT放射组学；重型颅脑损伤；压力振幅相关指数

【中图分类号】R651.1+5

【文献标识码】A

【基金项目】山西省卫生计生委科研课题(2019151)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.02.006

The Value of CT Imaging Omics Features in Predicting Relevant Indices in Patients with Severe Traumatic Brain Injury*

CHEN Gui-ping*, LI Min, TIAN Zhi-hua, SHEN Jian-bo, CUI Jie, DUAN Hai-feng, ZHANG Hao, RU Xiao-hong.

Department of Neurosurgery, Jincheng People's Hospital, Jincheng 048000, Shanxi Province, China

ABSTRACT

Objective To explore the application value of machine learning models based on CT radiomics features in predicting pressure amplitude correlation index (RAP) in patients with severe traumatic brain injury (sTBI). **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical and imaging data of 36 patients with traumatic brain injury. All patients underwent surgical treatment, continuous intracranial pressure monitoring, and invasive arterial pressure monitoring. Collect pressure amplitude correlation index (RAP) within 1 hour after surgery. Select 3 volumes of interest (VOIs) from the patient's postoperative brain CT images at 1 hour, and extract 93 radiomics features from each VOI. Three models were established to evaluate the RAP levels of patients. Evaluate the predictive performance of each model using indicators such as accuracy, precision, recall, F1 score, receiver operating characteristic (ROC) curve, and area under curve (AUC). **Results** The optimal number of features for the three RAP prediction models is 5 each. The prediction accuracy of the hippocampal model is 77.78%, accuracy is 88.24%, recall is 60%, F1 score is 0.6, and AUC is 0.88. The prediction accuracy of the brainstem model is 63.64%, accuracy is 58.33%, recall is 60%, F1 score is 0.54, and AUC is 0.82. The prediction accuracy of the thalamic model is 81.82%, the accuracy is 88.89%, the recall is 75%, the F1 score is 0.77, and the AUC is 0.96. **Conclusion** CT radiomics can predict RAP levels in patients with sTBI, and may establish a non-invasive method for monitoring intracranial pressure (NI-ICP).

Keywords: CT Radiomics; Severe Traumatic Brain Injury; Pressure Amplitude Correlation Index

重症监护治疗是患者治疗过程中非常重要的一部分，其中颅内压监测对于神经危重治疗是必要的^[1]。在临床工作中，单靠颅内压监测并不能提供有关患者颅内压的全面信息，其派生参数如振幅与压力的关系等能更全面、客观地反映患者的颅内压水平^[2]。RAP能更全面、客观地反映患者颅内压水平的变化，有助于医生对患者的治疗做出决策和调整，准确实施个体化医疗^[3]。实施颅内压监测依赖于手术放置的颅内压监测探头，这还不符合现代神经外科对速度、准确性和效率的追求。CT扫描是神经外科应用最广泛的影像技术之一，具有快速、无创、高效等优点，在神经外科治疗中起着关键作用^[4]。过去，临床医生用CT图像来解释颅内结构的移位程度来评估患者的颅内压水平，但这种方法缺乏理论支持。本研究的实质是从CT图像中获取高通量、定量的成像特征，对特征进行过滤，并通过机器学习建立合理的预测模型^[5]。本研究旨在探讨颅脑损伤患者CT影像组织学特征与RAP的关系，揭示基于CT影像组织学特征构建的机器学习模型能否客观、实时地反映患者的颅内压相关参数，探讨该机器学习模型在实现无创性颅内压监测方面的临床应用价值。

1 资料与方法

1.1 研究资料 收集本院2020年1月至2023年4月收治的重型颅脑损伤患者的临床资料并进行分析。

纳入标准如下：有明确外伤史的闭合性颅脑损伤急诊入院；年龄大于18岁，年龄小于65岁，不分性别；接受有创颅内压监测；术后1h内复查头颅CT。排除标准：有创伤性脑损伤、脑梗塞、脑肿瘤或其他神经系统疾病或颅脑手术后可能导致解剖结构异常的患者；既往有凝血障碍和血液系统相关疾病的患者。该研究方案符合《赫尔辛基宣言》的伦理指导方针，并得到医院伦理委员会的批准。参与者的知情权得到充分保障，并在批准文件中予以说明。

1.2 研究方法 除基线特征外，主要收集和分析术后头颅CT数据。CT相关特征取自64层螺旋CT机监测颅内压之前的最后一次头颅CT的数字成像和医学通信(DICOM)文件。根据常规CT扫描方案，CT片从枕大孔至顶端平行于眶内平面。扫描层厚1mm。术后均送回ICU。所有患者均行桡动脉穿刺术，动脉留置针连接压力感受器，压力感受器连接床边监护仪，持续有创监测动脉压。最后，数据采集器通过网线端口连接到床边监护仪，实时采集颅内压相关参数。记录监测开始后1h内采集的所有RAP数据(监测采样频率为3次/S，1h内共1200个数据)，计算RAP平均值作为分析指标^[6]。

术后1h内完成CT扫描后，用模块从患侧的海马回、脑干、丘脑提取3个VOI，大小为5×5×5 mm。同时，使用放射组学模块分别提取了这三个VOI中的93个放射组学特征^[7]。接下来，我们执行基于Shap值的特征选择。Shap值可以用来衡量模型中每个特征对预测结果的贡献。通过计算Shap，得到特征在模型中的重要程度排序，并选取最

【第一作者】陈贵平，男，副主任医师，主要研究方向：颅脑损伤、颅内胶质瘤化疗新进展。E-mail: boy3566@126.com

【通讯作者】陈贵平

重要的5个特征作为分析指标^[3]。最后,根据为三个VOI选择的特征,建立了三个随机森林模型来评估患者的RAP水平。根据以往的研究^[2],RAP>0.4被认为是预后不良的指标。本研究以0.4为阈值,用RAP进行二分法判断。

1.3 统计学方法 使用Python 3.8对数据进行统计分析。使用Numpy模块和Pandas模块进行数据运算和排序,使用SHAP模块进行特征选择,使用Sklearn模块建立模型,使用Matplotlib模块进行绘图。符合正态分布的连续变量用均值(M)±SD表示,不符合正态分布的连续变量用中位数和四分位差(IQR)表示,分类变量用频率和百分比表示。准确度、精密度、召回率和F1评分用于评

价每个模型的性能。在所有四种模型中,都使用受试者操作特征曲线下的面积来评估歧视。

2 结果

2.1 基于海马回、脑干和丘脑的Shap值的特征重要性分析 基于SHAP值的特征重要性排序如图1所示,共纳入36例sTBI患者,其中男性25例(69.44%),女性11例(30.56%)。参与者年龄在18 - 65岁之间,中位年龄为47岁(IQR: 29-54岁)。急诊入院时格拉斯哥昏迷评分(GCS)中位数为6 (IQR: 4-7); 27例(75%)患者入眼时单侧或双侧瞳孔光反射异常,其中术后瞳孔缩小14例(51.85%)。

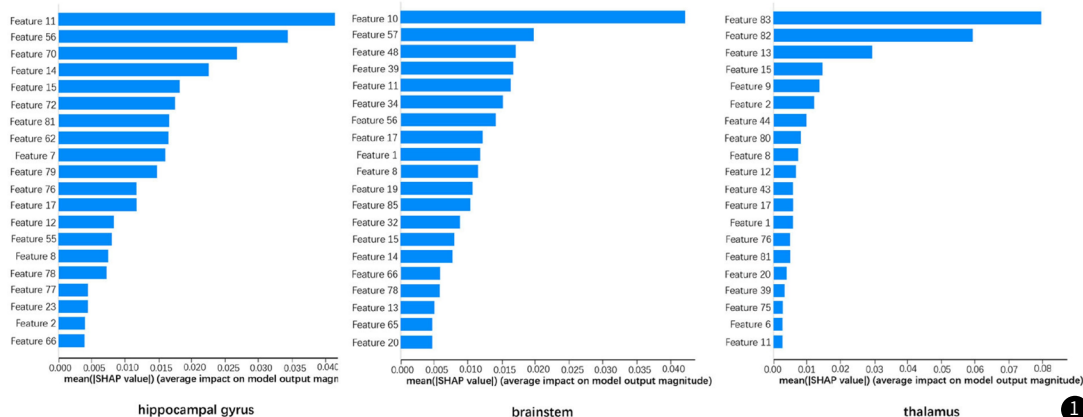


图1 基于海马回、脑干和丘脑的Shap值的特征重要性分析。

2.2 基于纹理特征和形态特征的模型性能分析 具体如图2,显示了三种模型在预测RAP水平方面的性能。3种RAP预测模型的最佳特征数分别为5个。对海马区模型的预测准确率为77.78%,准确率为88.24%,召回率为60%,F1得分为0.6, AUC为0.88。对脑干模型的预测准确率为63.64%,准确率为58.33%,召回率

为60%, F1得分为0.54, AUC为0.82。丘脑预测模型的准确率为81.82%,准确率为88.89%,召回率为75%, F1得分为0.77, AUC为0.96。三种模型均具有较强的预测能力,其中丘脑模型对RAP的预测能力最强。

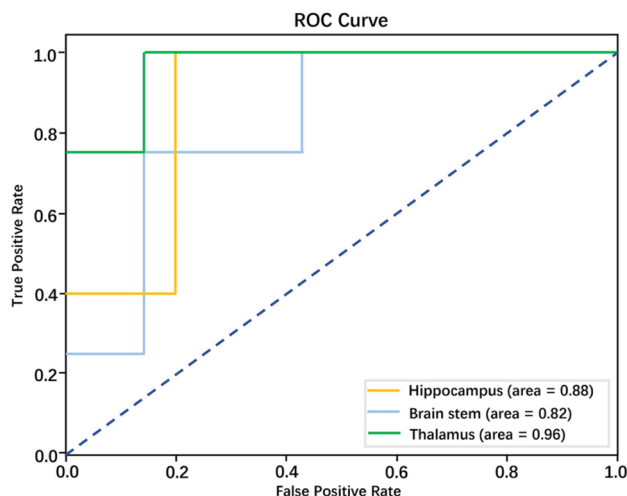


图2 基于放射组学特征的模型在区分RAP水平方面的性能; 这些模型的AUC分别为0.88、0.82和0.96。

3 讨论

本研究回顾分析了颅脑损伤患者手术治疗后的CT图像,进行纹理分析,根据选定的形态结构得到的纹理特征,建立了三个预测RAP水平的模型,并与有创性颅内压(I-ICP)监测。结果表明,三种模型对颅脑损伤患者的RAP水平均有较强的预测能力,丘脑模型对RAP的预测能力最强^[7]。所有这些结果表明,CT放射组学有可能建立一种无创监测颅内压的方法^[8]。

颅内压升高是颅脑损伤患者的主要病理生理改变,也是导致脑功能不可逆损害的主要原因。对颅脑损伤合并颅内压的患者进行伤后早期监测,并根据变化进行积极的干预是降低死亡率和致残率的有效方法^[9]。目前的颅内压监测技术是侵入性的,需要在患者的头骨内放置颅内压监测探头,这可能会导致感染和出血等并发症^[10]。有时,体内植入颅内压监测探头的时间窗口不符合治疗需要,为避免感染的发生,不得不终止监测,无法满足后续治疗的颅内压监测需求。但是,没有既定的NI-ICP监测方法可以作为I-ICP监测的黄金标准的替代品^[11]。为了解决上述问题,有研究评估了一种新的NI-ICP监测方法,该方法使用基于大脑声学特性的算法来确定ICP。有研究尝试在数学模型的基础上使用脑血流速度(CBFV)和动脉血压(ABP)对颅内压进行无创评估^[12]。有研究提出一种用视网膜小动脉和小静脉直径比(A/V比)来评估颅内压的方法,A/V比可以用眼底照相来测量,它们将颅内压的变化与视网膜血管的直径联系起来^[13]。然而,这些方案都没有在临床实践中得到广泛推广。尽管颅内压监测已有半个多世纪的历史,其应用技术在这一过程中也发生了很大的变化,但与其他科学进步的发展相比,其本身仍有很大的改进空间^[14]。

随着人们对无创概念认识的加深,越来越多的方法被提出,其中基于CT图像的颅内压评估是最优越的方法^[15]。CT通常是颅脑损伤的一线影像检查方法。在过去,CT图像的分析仅限于对结构信息的解释,尽管CT被广泛使用,其对检测颅内压升高的诊断准确性及其与颅内压测量的相关性都是未知的^[16]。CT纹理特征的分析为建立相关的评估标准和监测技术提供了一个前景。仅用严重的主观偏见来解释形态结构信息。纹理特征是可以量化的,可以对其进行分析,使抽象的ICP监测数据具体化,为其解释提供更客观的依据^[17]。在这里,我们分析纹理特征,然后将它们进行统计整合,形成一个机器学习模型来预测sTBI患者的RAP。这是对传统的用于预测颅内压的机器学习模型的补充,填补了机器学习模型在预测颅内压相关参数方向上的空白^[18]。

颅脑损伤后的主要损害是重要的颅内结构和功能的破坏^[19]。在这些原发损伤的基础上,由于脑水肿和血肿造成的继发性损伤进一步加剧了对脑组织的损害,并导致病情恶化^[20]。本研究选取三个重要的颅内结构作为VOI特征提取的模型,试图充分探讨CT影像组织学在机器学习中预测RAP的能力。在三种模型中,丘脑模型的预测能力最强,我们分析了其中的原因^[6,9,21]:(1)丘脑结构位于脑组织的深层,其变形和CT值变化受压力变化的影响较小;(2)丘脑结构形态稳定,是纹理特征提取的理想储存库;(3)丘脑内密集的血供和血流均匀。上述特征在特征提取中具有较强的普适性,能够充分反映脑组织内部的变化。我们的研究充分描述了基于纹理分析的RAP能力的机器学习模型的构建,而基于上述模型的未来研究可以继续探索非侵入性颅内压监测方案的可行性。这为成功实施非侵入性颅内压监测提供了潜在的选择。然而,本研究也存在一定的局限性^[22]。首先,病例数量较少。其次,研究集中在单一颅脑损伤类型。第三,在研究中应考虑回顾患者的既往病史。上述问题将在以后的研究中讨论,进一步的工作将侧重于扩大数据库的容量和联合多中心协作。应改进CT影响组织学量化的方法,并制定更详细和标准化的标准,以充分考虑病例间差异对研究的影响,应通过更复杂的学习模型进行评估。

综上所述,构建了基于纹理特征分析的机器学习模型,能够对颅脑损伤患者的RAP进行预测。同时,该分析预测模型的构建对实现无创颅内压监测具有应用价值和促进作用。

参考文献

- [1] Trofimov A O, Agarkova D I, Trofimova K A, et al. Changes of arterial and venous cerebral blood flow correlation in moderate-to-severe traumatic brain injury: a CT perfusion study[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2023, 1438: 51-58.
- [2] Srinivasan V, Hall J, Wahlster S, et al. Associations between clinical characteristics of cardiac arrest and early CT head findings of hypoxic ischaemic brain injury following out-of-hospital cardiac arrest[J]. *Resuscitation*, 2023, 190: 109858.
- [3] Siempis T, Georgalis P A, Lianos G, et al. Blood biomarkers for prediction of positive CT findings in mild traumatic brain injury in paediatric population[J]. *J Integr Neurosci*, 2023, 22(4): 91.
- [4] Sekar A, Datta D, Patnaik A. Rotterdam CT score as a predictor of surgical outcome in children with traumatic brain injury[J]. *Indian J Pediatr*, 2023.
- [5] Sakkas A, Weiss C, Wilde F, et al. Impact of antithrombotic therapy on acute and delayed intracranial haemorrhage and evaluation of the need of short-term hospitalisation based on CT findings after mild traumatic brain injury: experience from an oral and maxillofacial surgery unit[J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2023.
- [6] Sakkas A, Weiss C, Wilde F, et al. Justification of indication for cranial CT imaging after mild traumatic brain injury according to the current national guidelines[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(11).
- [7] Sakkas A, Weiss C, Ebeling M, et al. Clinical indicators for primary cranial CT imaging after mild traumatic brain injury—a retrospective analysis[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(10).
- [8] Reyes J, Spitz G, Major B P, et al. Utility of acute and subacute blood biomarkers to assist diagnosis in CT-negative isolated mild traumatic brain injury[J]. *Neurology*, 2023, 101(20): e1992-e2004.
- [9] Picarra C, Winzeck S, Monteiro M, et al. Automatic localisation and per-region quantification of traumatic brain injury on head CT using atlas mapping[J]. *Eur J Radiol Open*, 2023, 10: 100491.
- [10] Park N, Barbieri G, Turcato G, et al. Multi-centric study for development and validation of a CT head rule for mild traumatic brain injury in direct oral anticoagulants: the HERO-M nomogram[J]. *BMC Emerg Med*, 2023, 23(1): 122.
- [11] Lagares A, Castano-Leon A M, Richard M, et al. Variability in the indication of brain CT scan after mild traumatic brain injury. A transnational survey[J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2023, 49(3): 1189-1198.
- [12] Khosh-Fetrat M, Kosha F, Ansari-Moghaddam A, et al. Determining the value of early measurement of interleukin-10 in predicting the absence of brain lesions in CT scans of patients with mild traumatic brain injury[J]. *J Neurol Sci*, 2023, 446: 120563.
- [13] Kashkoush A I, Potter T, Pettitt J C, et al. Novel application of the Rotterdam CT score in the prediction of intracranial hypertension following severe traumatic brain injury[J]. *J Neurosurg*, 2023, 138(4): 1050-1057.
- [14] Jiang B, Ozkara B B, Creeden S, et al. Validation of a deep learning model for traumatic brain injury detection and NIRIS grading on non-contrast CT: a multi-reader study with promising results and opportunities for improvement[J]. *Neuroradiology*, 2023, 65(11): 1605-1617.
- [15] Hofmann B B, Fischer I, Donaldson D M, et al. Evaluation of MTT Heterogeneity of perfusion CT imaging in the early brain injury phase: an insight into aSAH Pathophysiology[J]. *Brain Sci*, 2023, 13(5).
- [16] Jia X, Li X, Ji Q, et al. Serum biomarkers and disease progression in CT-negative mild traumatic brain injury[J]. *Cereb Cortex*, 2023.
- [17] Habte Y W, Pajer H B, Abicho T B, et al. Validation of the Canadian CT head rule and the New Orleans criteria for mild traumatic brain injury in Ethiopia[J]. *World Neurosurg*, 2023, 173: e600-e605.
- [18] Goswami B, Nanda V, Kataria S, et al. Prediction of in-hospital mortality in patients with traumatic brain injury using the Rotterdam and Marshall CT scores: a retrospective study from western India[J]. *Cureus*, 2023, 15(7): e41548.
- [19] Angelova P, Kehayov I, Ordóñez-Rubiano E G, et al. Long-term tractography evaluation of corpus callosum impairment after severe traumatic brain injury in patients with isolated intraventricular hemorrhage on admission CT: two illustrative cases and a literature review[J]. *Korean J Neurotrauma*, 2023, 19(2): 249-257.
- [20] Colas L, Graf S, Ding J, et al. Limited benefit of systematic head CT for mild traumatic brain injury in patients under antithrombotic therapy[J]. *J Neuroradiol*, 2023, 50(1): 30-35.
- [21] Brossard C, Greze J, de Busschere J A, et al. Prediction of therapeutic intensity level from automatic multiclass segmentation of traumatic brain injury lesions on CT-scans[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 20155.
- [22] Aramvanitch K, Khachornwattanakul K, Vichiensanth P, et al. Age-appropriateness of decision for brain CT scan in elderly patients with mild traumatic brain injury[J]. *World J Emerg Med*, 2023, 14(3): 227-230.

(收稿日期: 2023-12-08)

(校对编辑: 江丽华)