

比较基于 CT 图像的纹理分析与临床评分在预测急性缺血性脑卒中出血性转化中的价值

宋心雨, 孙 正, 李跃华

【摘要】 目的 本研究试图利用 CT 图像的纹理特征预测缺血性脑卒中出血性转化(hemorrhagic transformation, HT)的发生,并与传统的临床预测评分进行比较。**方法** 本研究共纳入 73 例急性前循环缺血性脑卒中患者,所有患者都进行再灌注治疗。根据随访 ADC 图像弥散受限区勾画出梗死区感兴趣区域(region of interesting, ROI),并匹配到计算机断层血管造影(computed tomographic angiography, CTA)和平扫 CT (non-contrast CT, NCCT)相应的缺血区域。在所有患者中随机抽取 5 个 HT 和 5 个非 HT 组成测试组,余下组成训练组。分别在 CTA 和 NCCT 训练组中选取最有预测价值的 6 个纹理特征,然后将这些特征带入不同分类器进行 5 倍交叉验证训练,最后根据训练后的分类器对测试组进行预测评估。此外,对所有训练组患者进行 4 项临床评分(HAT, SEDAN, HIAT2, THRIVE-c)。**结果** 训练后的分类器模型在 CTA 和 NCCT 中都表现出明显的预测价值。在 CTA 预测模型中,线性支持向量机(linear SVM)分类器预测效能最好,其在 5 倍交叉验证中的平均预测准确度为 0.816, AUC 值为 0.890;在测试组中预测准确度为 0.800,敏感性为 0.600,特异性为 1.000。逻辑回归(logistic regression, LR)为 NCCT 中表现最好的分类器,但 NCCT 模型 HT 的预测性能稍逊于 CTA 模型,其在训练组中预测准确度为 0.697, AUC 值为 0.763。NCCT 测试组的预测准确度为 0.700,敏感性为 0.600,特异性为 0.800。相比于纹理分析模型,4 种临床评分预测表现较差, AUC 值均小于 0.700。**结论** 基于 CT 图像脑缺血区的纹理分析(CTA 和 NCCT)具有预测 AIS 患者再灌注治疗后 HT 的能力,预测效能优于传统的临床评分方法。

【关键词】 缺血性脑卒中;出血性转化;纹理分析;临床评分;预测

中图分类号:R743.3 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2024)-03-0230-06

CT images texture analysis versus clinical scores in predicting hemorrhagic transformation of acute ischemic stroke SONG Xinyu, SUN Zheng, LI Yuehua. Department of Interventional Radiology, Affiliated Sixth People's Hospital, School of Medicine, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200233, China

Corresponding author: LI Yuehua, E-mail: liyuehua77@sjtu.edu.cn

【Abstract】 Objective To assess the value of CT image texture features in predicting the occurrence of hemorrhagic transformation(HT) in ischemic stroke, and to compare it with the traditional clinical prediction scores. **Methods** A total of 73 patients with acute anterior circulation ischemic stroke were enrolled in this study. All patients received reperfusion treatment. The region of interesting (ROI) of the infarction area was outlined according to the diffusion restricted area displayed on the follow-up ADC images, which were matched to the corresponding ischemic region on computed tomographic angiography(CTA) and on plain CT scan(non-contrast CT, NCCT). Five patients with HT and 5 patients with non-HT were randomly selected and used as the test set, and the remaining patients were assigned to the train set. The 6 texture features that had the most predictive value were separately selected from the CTA sets and NCCT train set, then the training of classifiers was carried out by using the 5-fold cross-validation method. Finally, the test set was evaluated according to the trained classifier. Besides, the determination of four clinical scores(HAT, SEDAN, HIAT2, THRIVE-c) was performed for all patients in the train set. **Results** The trained classifiers model performed well in not only

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2024.03.002

基金项目:国家自然科学基金(8225024),上海市临床重点专科(shslczdsk03203)

作者单位:200233 上海 上海交通大学医学院附属第六人民医院放射介入科

通信作者:李跃华 E-mail: liyuehua77@sjtu.edu.cn

CTA but also NCCT. In the CTA prediction model, linear SVM was chosen as the final classifier with 0.816 validation accuracy and 0.890 AUC value; and with 0.800 test accuracy, 0.600 sensitivity, and 1.000 specificity in external test set. Logistic regression(LR) was the best-performing classifier in NCCT. The predicted performance of HT was slightly worse than that of CTA, which had 0.697 validation accuracy and 0.763 AUC value. The test set of NCCT achieved 0.700 accuracy with 0.600 sensitivity and 0.800 specificity. Compared to the texture analysis models, all the four clinical scores showed a modest prediction efficiency in HT and AUC values, which were no more than 0.700. **Conclusion** Texture analysis of cerebral ischemic area based on CT images (CTA and NCCT) has the ability to predict HT after reperfusion treatment in AIS patients, and it is superior to traditional clinical scoring methods. (J Intervent Radiol, 2024, 33: 230-235)

【Key words】 ischemic stroke; hemorrhagic transformation; texture analysis; clinical score; prediction

溶栓和机械取栓是目前治疗急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS)首选和最有效的再灌注方法^[1-2],但同时也增加了脑梗死后出血性转化(hemorrhagic transformation, HT)的风险^[3-5]。虽然少量渗血常常表现为无症状,但它们影响后续临床抗栓治疗^[6]。而具有占位效应的出血常表现为症状性出血,可恶化患者的临床状况。因此,预测 AIS 再灌注治疗后 HT 可以增加治疗的安全性,减少不良预后。既往研究表明, AIS 患者的基线影像学表现对 HT 具有预测价值^[4,7-8],而 CT 相关基线表现已纳入临床治疗指南^[1]和 HT 风险评分中^[9-11]。

纹理分析由于其能够对组织形态特征进行量化,已被广泛应用于神经系统疾病的定性诊断、疗效评估和预后判断^[12]。最近的研究显示,基于 AIS 患者基线影像的纹理分析可以预测 HT 的发生^[13-17]。本研究将纹理分析与 CT 图像相结合,探讨基于 CT 图像(CTA 和 NCCT)的纹理分析预测 HT 的价值,并与临床预测评分进行比较。

1 材料与方法

1.1 研究对象

收集 2016 年 5 月至 2019 年 3 月在上海市第六人民医院急诊接受再灌注治疗(溶栓、机械取栓或桥接治疗)的 AIS 患者。纳入标准:①发病 24 h 内接受急诊 CT 检查(CTA 和 NCCT),近期随访 MRI 明确脑梗死并判断是否出血;②CTA 显示前循环大血管闭塞或严重狭窄;③发病前改良 Rankin 量表(mRS)评分 ≤ 2 分。排除标准:①基线 CT 图像显示颅内血肿或蛛网膜下腔出血;②梗死侧具有大面积的陈旧性脑梗死、肿瘤或其他占位性病变;③梗死区伪影较大,影响纹理提取。

1.2 图像获取

NCCT 使用 64 通道 CT (飞利浦,Brilliance, 荷

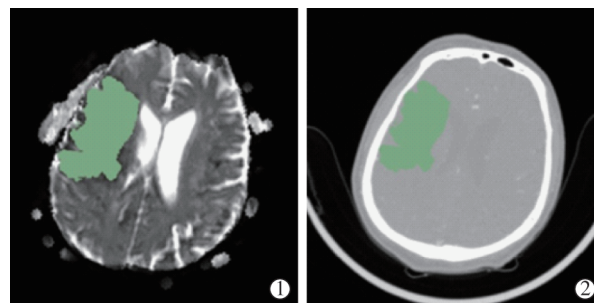
兰),扫描参数:120 kV, 230 mA, 5 mm 层厚。覆盖范围从颅底到颅顶,连续的轴向扫描平行于听眶线。先行 NCCT,后行螺旋扫描 CTA。以 3~5 mL/s 的肘前静脉单次注射 60 mL 造影剂后获得。CTA 采用 0.8 mm 层厚。在 CT 后处理工作台进行 CTA 容积重建以识别血管状况。随访 MRI 由 3.0T MR 扫描仪(飞利浦, Ingenia, 荷兰;西门子,skyra,德国)使用 8 通道相控阵头颅表面线圈进行。扫描参数如下:TR=4 200 ms,TE=90 ms,层厚=4 mm,FOV=240×240,b=0,1000 s/mm²。

所有图像均由 2 名放射科医师(1 名有 10 年工作经验的放射科主任医师和 1 名擅长脑卒中影像的放射科住院医师)采用双盲法阅读。当出现意见不一致时,以协商方式解决。

1.3 纹理分析

MR 中的表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图反映了真实的弥散受限区域,即梗死区。因此,我们选择 ADC 图作为判断梗死区的金标准。首先将 ADC 图输入 3Dslicer 软件,准确勾画缺血区域 ROI。然后将其与 CTA 和 NCCT 图像相应区域进行配准,完成 ROI 的转化,见图 1。

在本研究中,我们在所有患者中随机抽取 5 个 HT 和 5 个非 HT 组成测试组,其余患者组成训练组用于预测模型的建立和验证。使用软件包



①ADC 图中勾画出的梗死区 ROI;②CTA 和配准转化后的 ROI

图 1 ROI 转化过程

“Pyradiomics” (<https://pyradiomics.readthedocs.io>) 对 ROI 进行纹理特征提取。这是一个开源 python 包, 用于从医学图像中提取放射组学特性。

在特征提取之后需要进行特征选择, 以选出最有预测价值的纹理特征。在本研究中, 特征选择主要分为两部分, 首先通过 T 检验筛选出具有统计学意义的特征 ($P < 0.05$), 然后采用 AIC (akaike information criterion) 逐步回归法筛选出最终的 6 个纹理特征。

根据最终选择的特征, 采用以下分类器进行训练: 线性判别 (linear discriminant, LD)、逻辑回归 (logistic regression, LR)、 k 最近邻 (k -nearest-neighbor, KNN)、高斯朴素贝叶斯 (gaussian naive bayes, GNB)、决策树 (decision tree, DT)、支持向量机 (support vector machine, SVM)。在不同分类器中对训练组进行 5 次交叉验证, 然后根据交叉验证结果构建受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线。最后选择最优分类器对试验组进行预测评估。具体流程见图 2。

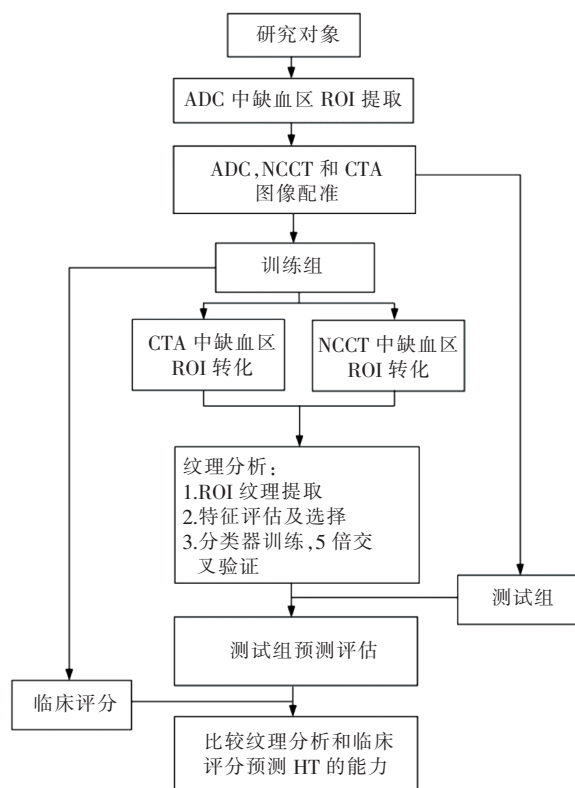


图 2 总体流程图

1.4 临床评分

我们选择了 4 种常用且具有较高预测效能的临床 HT 预测评分: HAT 评分^[9], SEDAN 评分^[10], THRIVE-c 评分^[18], HAIT2 评分^[11]。HAT 和 SEDAN

主要用于评估溶栓后 HT 的风险, THRIVE-c 和 HIAT2 主要用于评估取栓后 HT 的风险。对训练组患者分别进行 4 种临床评分评估, HAT、SEDAN 和 HIAT2 采用手动评分, THRIVE-c 通过回归方程自动评分 (www.thrivescore.org), 根据评分结果分别构建 ROC 曲线。最后比较 4 种临床评分之间及与纹理分析之间预测能力的差异, 具体流程见图 2。

1.5 统计学方法

在特征选择的第一部分, 变量的显著性由 t 检验得到, 而在 AIC 的逐步回归中, 回归系数的显著性采用 t 检验, 回归方程的显著性采用 F 检验。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。对纹理分析交叉验证和临床预测评分结果分别构建 ROC 曲线并计算曲线下面积 (area under curves, AUC)。4 项临床评分 AUC 值比较采用 Z 检验, 而相关性分析采用 Spearman 秩相关法。所有统计和模型构建在 MATLAB (R2017b)、R (3.5.3) 和 Prism 8 中进行。

2 结果

最终共纳入 73 例患者, 年龄 (69 ± 13) 岁, 其中再灌注治疗后出现 HT 患者 30 例 (41.1%), 与既往研究相一致^[19-20]。所有患者均为前循环性脑梗死, 相同比例的患者 (35.6%) 进行了溶栓或取栓治疗, 而接受桥接治疗的患者占总数的 28.8%。患者的详细信息见表 1。

表 1 研究人群基线资料 ($n=73$)

参数	数值
年龄 (岁)	69 ± 13
性别 [$n(\%)$]	
男	48 (65.8)
女	25 (34.2)
发病到 CTA 时间 (min)	114 (85 ~ 171)
随访 MRI 时间 (d)	2 (1 ~ 4)
基线 NIHSS 评分	10.5 (4 ~ 18)
HT [$n(\%)$]	30 (41.1)
高血压 [$n(\%)$]	46 (63)
糖尿病 [$n(\%)$]	18 (24.7)
房颤 [$n(\%)$]	32 (43.8)
L-LDL (mmol/L)	2.7 ± 0.9
溶栓 [$n(\%)$]	26 (35.6)
取栓 [$n(\%)$]	26 (35.6)
溶栓+取栓 [$n(\%)$]	21 (28.8)

符合正态分布的变量数据采用均值 \pm 标准差表示; 不符合正态分布的变量数据采用四分位法表示; 计数数据采用例数 (百分比) 表示

2.1 基于 CTA 和 NCCT 脑缺血区纹理分析预测性能

基于 CTA 图像最终挑选的预测纹理特征为: fl17、glcm16、glcm20、glszm1、glszm5、glszm7, 共 6 个特征。根据 CTA 和 NCCT 分类器 5 倍交叉验证结果

显示,线性支持向量机(Linear SVM)分类器综合性能最好,被选作最终的预测分类器。在 CTA 训练组中其预测准确度为 0.816,AUC 值为 0.890。CTA 测试组预测准确度为 0.800,敏感性为 0.600,特异性为 1.000。NCCT 最终选择的纹理特征为 gldm5、gldm11、glrlm8、glrlm16、glszm1、glszm5。逻辑回归(logistic regression,LR)为 NCCT 中表现最好的分类器,NCCT 预测模型的预测效能略低于 CTA,训练组预测准确度为 0.697,AUC 值为 0.763。NCCT 测试组预测准确度为 0.700,敏感性为 0.600,特异性为 0.800,见表 2、图 3。

表 2 CTA 和 NCCT 纹理预测模型性能比较

参数	CTA	NCCT
训练准确度	0.816	0.697
训练敏感性	0.816	0.737
训练特异性	0.816	0.658
AUC 值	0.890	0.763
测试准确度	0.800	0.700
测试敏感性	0.600	0.600
测试特异性	1.000	0.800

2.2 临床评分的 HT 预测性能

4 种临床评分均表现出一定的预测价值,AUC 值均大于 0.5,见图 4、表 3。本研究显示当 HAT 评分阈值为 1.5 时其敏感性和特异性均较好,分别为 0.640 和 0.605。而 SEDAN 和 THRIVE-c 的特异性较好,分别为 0.816 和 0.737,但是敏感性较差。HIAT2 的结果与 SEDAN 和 THRIVE-c 评分相反。同时,分析也表明 4 种评分之间的相关性较好,预测性能无统计学差异,见表 4。

3 讨论

目前 HT 的发病机制有很多假说,包括脑梗死后缺血损伤、再灌注损伤、凝血功能障碍、血脑屏障

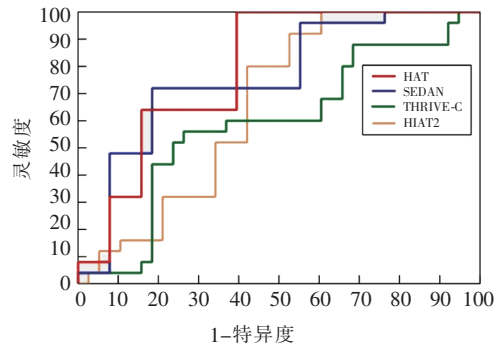


图 4 4 种临床评分的 ROC 曲线

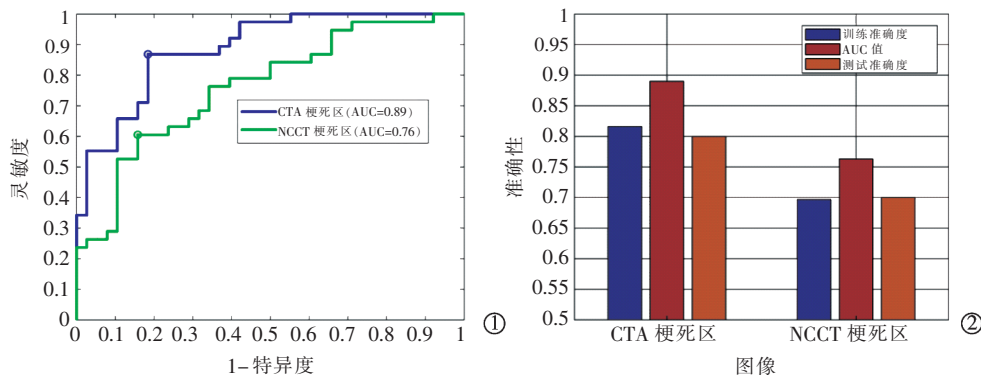
表 3 4 种临床评分的 HT 预测性能

临床评分	HAT	SEDAN	THRIVE-c	HIAT2
阈值	1.5	3.5	0.545	2.5
敏感性	0.640	0.480	0.560	0.920
特异性	0.605	0.816	0.737	0.395
AUC 值	0.648	0.661	0.592	0.606
标准差	0.066	0.067	0.075	0.070
95%CI	0.517~0.764	0.531~0.776	0.461~0.714	0.475~0.727

表 4 4 种临床评分相关性及其 AUC 比较

类别	相关性比较		AUCs 比较	
	r 值	P 值	Z 值	P 值
HAT 和 SEDAN	0.682	<0.001	0.220	0.8257
HAT 和 THRIVE-c	-0.663	<0.001	0.888	0.3747
HAT 和 HIAT2	0.541	<0.001	0.603	0.5463
SEDAN 和 THRIVE-c	-0.660	<0.001	1.106	0.2686
SEDAN 和 HIAT2	0.673	<0.001	0.915	0.3602
THRIVE-c 和 HIAT2	-0.592	<0.001	0.184	0.8538

损伤等^[21]。医学影像主要通过评估血脑屏障(blood-brain barrier, BBB)损伤来预测 HT 的发生,BBB 渗透率是反映 BBB 损伤程度的指标。Kim 等^[22]的研究显示,再灌注治疗前梗死区局部 BBB 渗透率 $\geq 7 \text{ mL}/(100 \text{ g} \cdot \text{min})$ 时,预测 HT 的敏感性和特异性分别达到 80%和 71%。BBB 渗透率是基于 CT 灌注图像计算的定量指标,目前的研究表明,具有灌注信



①CTA 和 NCCT 训练组在 5 倍交叉验证中最优分类器的 ROC 曲线;②CTA 和 NCCT 纹理预测模型比较柱状图

图 3 基于 CTA 和 NCCT 纹理分析预测效能

息的图像在预测 HT 方面具有较高的准确性^[7,15,22]。而纹理分析可以通过高通量提取相关纹理特征发现肉眼不能识别的 BBB 完整性和灌注信息的细微变化,具有更大的预测潜力。Valdés Hernández 等^[23]根据 MR 图像发现脑小血管疾病负担越重纹理的“均质性”越高,这在正常脑组织中更明显;脑白质变性越严重增强前后脑脊液纹理差异越明显,这两点显示纹理分析具有评估 BBB 完整性的价值。而 Kassner 等^[24]在对 MRT1W 增强图像纹理分析后发现相关特征与 HT 的发生具有明显相关性,同时显示其预测准确性要高于通过肉眼观察 BBB 完整性。这些研究说明,灌注图像与纹理分析相结合可以进一步提高预测能力,而本研究也证实了这一点。

本研究将纹理分析和 CT 图像相结合来预测 HT 的发生。最终基于 CTA 图像的训练准确度为 0.816, AUC 值为 0.890, 测试准确度为 0.800。同时,我们的研究还包括 NCCT 预测 HT, 其训练准确度为 0.697, AUC 值为 0.763, 测试准确度为 0.700。该结果表明 CTA 的预测准确度优于 NCCT。可能的原因是 NCCT 图像仅包含解剖信息,其纹理预测基于对早期缺血变化大小和程度的判断,而 CTA 图像不仅包括解剖信息还包括灌注信息。灌注可以显示对比剂渗出,这也是纹理预测 HT 的基础之一^[24]。虽然 NCCT 的预测效果不如 CTA,但 NCCT 比 CTA 更方便、更容易获得,对于未行 CTA 扫描的患者(如非大血管闭塞患者)可能更有价值。Xie 等^[13]和 Wen 等^[14]的研究也显示出 NCCT 纹理预测 HT 的价值,预测 AUC 值分别为 0.750 和 0.797,与本研究结果相似。而 Zhai 等^[16]和 Meng 等^[17]基于 MR 图像建立的纹理分析预测模型显示优于本研究 NCCT 模型的预测效能,可能是因为磁共振可以提供更多的纹理信息,但是磁共振不是 AIS 的首选和常规检查,临床应用范围有限。此外,本研究基于 CTA 图像的 HT 预测准确度接近相关磁共振预测模型,而 CTA 图像更容易获取、应用范围更广,具有更大的临床应用前景。

本研究还测试了常用的 HT 临床预测评分,但数据显示这些评分方法的准确性略低于以往的研究报道^[9-11,25]。造成这个结果的原因可能是我们的样本量较小。此外,不同研究的研究对象也有所不同,我们的研究对象是 HT,而其他研究的对象则是症状性脑出血或临床预后。本研究显示这 4 种临床评分之间预测效能存在明显的相关性。因为我们选择的这些评分方法评价指标存在较大重叠,它们都包

括了 HT 的常见危险因素,如年龄、高血压、血糖水平、NIHSS 评分、房颤和影像学表现。值得一提的是,图像特征似乎在这些评分方法中更具决定性,许多改良评分方法在纳入影像学因素后其预测 HT 的准确性较前明显增加。例如,HIAT2 评分在纳入 ASPECTS 评分指标后,其预测 HT 的能力较 HIAT 显著提高^[11]。Flint 等^[26]在纳入了 ASPECTS 评分后也提高了 THRIVE-c 评分的 HT 预测能力。既往研究显示侧支循环不良会增加 HT 发生风险^[27]。因此,Ryu 等^[28]在临床评分中加入基于 CTA 的侧支评分后发现其预测性能明显改善。而本研究显示纹理预测方法优于所有 4 种临床评分方法,未来可以考虑将基于影像资料的纹理分析纳入这些评分方法中,进一步提高临床评分的准确性。

当然,本研究存在一些局限性:①研究是基于随访 ADC 图确定缺血区域,该区域与基线 CT 图像的真实缺血区存在不匹配。但是目前急诊 MR 检查较难获取,仅仅依靠 CT 图像难以明确早期缺血区域,未来进一步研究可以采用急诊 CTP 图像进行缺血区的勾画。②研究为单中心研究,入组标准严格,所以最终的病例数较少。此外,为了保证训练模型的可靠性,测试组的数量较少(5 个 HT 和 5 个非 HT 患者),但训练组和测试组都表现出较高的预测准确度。③由于样本量的原因,在研究中并没有对出血亚型进行分析和预测,尤其是 PH2,其与症状性出血及预后相关,这需要未来的大样本研究。

本研究显示基于 CT 图像脑缺血区的纹理分析(NCCT 和 CTA)具有预测 HT 的能力。两者的预测效能明显优于 4 种临床预测评分。

[参考文献]

- [1] Powers WJ, Rabinstein AA, Ackerson T, et al. Guidelines for the early management of patients with acute ischemic stroke: 2019 update to the 2018 guidelines for the early management of acute ischemic stroke: a guideline for healthcare professionals from the American heart association/American stroke association [J]. Stroke, 2019, 50: e344-e418.
- [2] Zhou TF, Zhu LF, Li TX, et al. Application of retrievable Solitaire AB stents in the endovascular treatment of acute ischemic stroke [J]. J Interv Med, 2018, 1: 77-81.
- [3] Zubair AS, Sheth KN. Hemorrhagic conversion of acute ischemic stroke [J]. Neurotherapeutics, 2023, 20: 705-711.
- [4] Roman LS, Menon BK, Blasco J, et al. Imaging features and safety and efficacy of endovascular stroke treatment: a meta-analysis of individual patient-level data [J]. Lancet Neurol, 2018, 17: 895-904.

- [5] 吕晓颖,王承汉,王正则,等.急性缺血性脑卒中取栓术后出血转化相关因素研究进展[J].介入放射学杂志,2022,31:310-314.
- [6] Liu L, Chen W, Zhou H, et al. Chinese stroke association guidelines for clinical management of cerebrovascular disorders: executive summary and 2019 update of clinical management of ischaemic cerebrovascular diseases[J]. Stroke Vasc Neurol, 2020, 5: 159-176.
- [7] Suh CH, Jung SC, Cho SJ, et al. Perfusion CT for prediction of hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2019, 29: 4077-4087.
- [8] Hong L, Hsu TM, Zhang YR, et al. Neuroimaging prediction of hemorrhagic transformation for acute ischemic stroke [J]. Cerebrovasc Dis, 2022, 51: 542-552.
- [9] Lou M, Safdar A, Mehdiratta M, et al. The HAT score: a simple grading scale for predicting hemorrhage after thrombolysis [J]. Neurology, 2008, 71: 1417-1423.
- [10] Strbian D, Michel P, Seiffge DJ, et al. Symptomatic intracranial hemorrhage after stroke thrombolysis: comparison of prediction scores[J]. Stroke, 2014, 45: 752-758.
- [11] Sarraj A, Albright K, Barreto AD, et al. Optimizing prediction scores for poor outcome after intra-arterial therapy in anterior circulation acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2013, 44: 3324-3330.
- [12] Fan Y, Feng M, Wang R. Application of radiomics in central nervous system diseases: a systematic literature review[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2019, 187: 105565.
- [13] Xie G, Li T, Ren Y, et al. Radiomics-based infarct features on CT predict hemorrhagic transformation in patients with acute ischemic stroke[J]. Front Neurosci, 2022, 16: 1002717.
- [14] Wen X, Xiao Y, Hu X, et al. Prediction of hemorrhagic transformation via pre-treatment CT radiomics in acute ischemic stroke patients receiving endovascular therapy[J]. Br J Radiol, 2023, 96: 20220439.
- [15] Xu J, Dai F, Wang B, et al. Predictive value of CT perfusion in hemorrhagic transformation after acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Brain Sci, 2023, 13: 156.
- [16] Zhai H, Liu Z, Wu S, et al. Predictive value of magnetic resonance imaging - based texture analysis for hemorrhage transformation in large cerebral infarction[J]. Front Neurosci, 2022, 16: 923708.
- [17] Meng Y, Wang H, Wu C, et al. Prediction model of hemorrhage transformation in patient with acute ischemic stroke based on multiparametric MRI radiomics and machine learning[J]. Brain Sci, 2022, 12: 858.
- [18] Flint AC, Rao VA, Chan SL, et al. Improved ischemic stroke outcome prediction using model estimation of outcome probability: the THRIVE-c calculation[J]. Int J Stroke, 2015, 10: 815-821.
- [19] Zhou Y, Xing P, Li Z, et al. Effect of occlusion site on the safety and efficacy of intravenous alteplase before endovascular thrombectomy: a prespecified subgroup analysis of DIRECT-MT [J]. Stroke, 2022, 53: 7-16.
- [20] Yang P, Zhang Y, Zhang L, et al. Endovascular thrombectomy with or without intravenous alteplase in acute stroke[J]. N Engl J Med, 2020, 382: 1981-1993.
- [21] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组.中国急性脑梗死后出血转化诊治共识 2019[J]. 中华神经科杂志, 2019, 52:252-265.
- [22] Kim T, Koo J, Kim SH, et al. Blood-brain barrier permeability assessed by perfusion computed tomography predicts hemorrhagic transformation in acute reperfusion therapy[J]. Neurol Sci, 2018, 39: 1579-1584.
- [23] Valdés Hernández MDC, Gonzalez-Castro V, Chappell FM, et al. Application of texture analysis to study small vessel disease and blood-brain barrier integrity[J]. Front Neurol, 2017, 8: 327.
- [24] Kassner A, Liu F, Thornhill RE, et al. Prediction of hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke using texture analysis of postcontrast T1-weighted Mr images[J]. J Magn Reson Imaging, 2009, 30: 933-941.
- [25] Pan Y, Peng Y, Chen W, et al. THRIVE-c score predicts clinical outcomes in Chinese patients after thrombolysis[J]. Brain Behav, 2018, 8: e00927.
- [26] Flint AC, Chan SL, Edwards NJ, et al. Outcome prediction in large vessel occlusion ischemic stroke with or without endovascular stroke treatment: THRIVE-EVT[J]. Int J Stroke, 2023, 18: 331-337.
- [27] Tian B, Tian X, Shi Z, et al. Clinical and imaging indicators of hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke after endovascular thrombectomy[J]. Stroke, 2022, 53: 1674-1681.
- [28] Ryu CW, Kim BM, Kim HG, et al. Optimizing outcome prediction scores in patients undergoing endovascular thrombectomy for large vessel occlusions using collateral grade on computed tomography angiography[J]. Neurosurgery, 2018, 83: 350-358.

(收稿日期:2023-06-06)

(本文编辑:茹 实)