

论 著

急性脑卒中血管内治疗后恶性脑水肿风险的列线图预测模型构建*

童俊¹ 彭明洋² 陈国中²
马跃虎² 姜海龙^{2,*}1.江苏省南京市中西医结合医院放射科
(江苏 南京 210000)

2.南京医科大学附属南京医院(南京市第一医院)医学影像科(江苏 南京 210006)

【摘要】目的 基于多模态MRI影像组学及临床危险因素构建列线图模型，探讨其预测急性脑卒中血管内治疗后恶性水肿风险的临床价值。方法 回顾性分析在南京市第一医院神经内科接收血管内治疗的急性脑卒中患者128例。将患者分为恶性脑水肿组和无恶性脑水肿组。对患者多模态MRI图像病变区进行影像组学特征提取及筛选，构建影像组学标签。应用多变量Logistic回归构建列线图模型，并对模型预测水肿的效能进行评价。结果 经筛选后与急性卒中恶性脑水肿高度相关的特征10个。ROC显示联合影像组学标签、年龄、入院NIHSS评分、DWI梗死体积、Tmax>6s体积构建的列线图模型预测训练集恶性脑水肿的AUC为0.959(敏感度和特异度：0.906、0.938)，预测测试集恶性脑水肿AUC为0.889(敏感度和特异度：0.953、0.850)。该列线图模型的一致性指数为0.913(95%CI: 0.881~0.942, $P<0.01$)。结论 多模态MRI影像组学联合临床特征的列线图模型可准确预测急性脑卒中血管内治疗后恶性脑水肿风险。

【关键词】卒中；弥散加权成像；灌注加权成像；恶性脑水肿；列线图模型

【中图分类号】R743

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金(82001811)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.01.011

Nomogram Prediction Model Construction of Malignant Brain Edema after Endovascular Treatment in Acute Stroke*

TONG Jun¹, PENG Ming-yang², CHEN Guo-zhong², MA Yue-hu², JIANG Hai-long^{2,*}.

1.Nanjing Integrated Traditional Chinese And Western Medicine Hospital, Nanjing 210000, Jiangsu province, China

2.Department of Radiology, Nanjing First Hospital, Nanjing Medical University, Nanjing 210006, Jiangsu province, China

ABSTRACT

Objective To explore the clinical value in predicting the malignant brain edema after endovascular treatment in acute stroke by constructing nomogram model based on multimodal MRI radiomics and clinical risk factors. **Methods** A total of 128 patients with acute stroke who received endovascular treatment in Nanjing First Hospital were analyzed retrospectively. Patients were divided into malignant brain edema group and no malignant brain edema group according to the CT or MRI within 72 hours. Multimodal MRI features of acute stroke patients were extracted and screened to construct radiomics tags. Multivariate Logistic regression was used to construct a nomogram model, and the performance of the model in predicting the edema was evaluated. **Results** After dimensionality reduction, 10 features that were highly associated with malignant brain edema were screened out. ROC showed that the AUC of nomogram model in the training set was 0.959 (sensitivity and specificity: 0.906, 0.938), which included age, NIHSS score on admission, DWI infarct volume, Tmax>6s volume and RadScore. The AUC in the test set was 0.889 (sensitivity and specificity: 0.953, 0.850). The consistency index of this nomogram model was 0.913 (95%CI: 0.881~0.942, $P<0.01$). **Conclusion** The nomogram model based on multimodal MRI radiomics and clinical features can accurately predict malignant brain edema after endovascular treatment in acute ischemic stroke.

Keywords: Acute Stroke; Diffusion Weighted Imaging; Perfusion Weighted Imaging; Malignant Brain Edema; Nomogram Model

脑卒中作为一种急性脑血管疾病，是全球第二大死因，且具有较高的致残率和复发率，已成为当今世界重要的社会和医疗问题。目前对于大血管闭塞的急性脑卒中患者，血管内治疗可使患者快速再通，获得血流再灌注^[1]。然而，高达26.9%以上的患者可发生恶性脑水肿的并发症，与卒中后死亡和神经功能恶化密切相关^[2]。早期预测脑卒中的风险可指导临床选择靶向治疗，以最大限度地降低卒中患者水肿、脑疝和继发性损失的风险。以往的研究显示基于临床或CT梗死体积、脑脊液体积可预测脑卒中恶性脑水肿发生^[3-5]。然而，CT对急性脑梗死显示敏感性较低。弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)和灌注加权成像(perfusion weighted imaging, PWI)作为急性脑卒中诊断及再灌注损伤判断的重要评估工具^[6-7]，在评估恶性脑水肿的价值中目前仍不清楚。同时，近年来，人工智能技术在严重依赖图像解释的放射学领域得到了蓬勃发展，为恶性脑水肿风险预测提供了新的机遇。其中影像组学可从图像中提取人类肉眼看不见的高维定量特征，机器学习是一种可靠的、自动化的图像评估工具，可提高图像预测的准确率^[8]。本研究旨在基于入院多模态MRI和临床相关资料，探讨急性脑卒中血管内治疗后恶性脑水肿的风险因素，并基于相关风险因素构建急性脑卒中血管内治疗后恶性脑水肿的列线图预测模型。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性分析自2019年1月至2021年6月收集在南京市第一医院神经内科住院并接受血管内治疗的急性脑卒中患者。

纳入标准：年龄18岁；血管内治疗前确诊为前循环大血管闭塞的急性脑卒中患者，且为首次发生；从症状开始至治疗的时间 24 h；治疗前行多模态MRI检查(DWI和PWI序列)，且无出血表现；治疗后72h之内有CT或MRI检查可供评估是否存在水肿发生。排除标准：合并症，如恶性肿瘤、严重器官衰竭或其他危及生命的疾病；影像资料不完整或无法评估。共纳入128例，其中男性69例，女性59例，平均年龄(69.39±14.21)岁。根据7: 3比例随机将患者分为训练集(n=90)和测试集(n=38)。本研究经南京市第一医院伦理委员会批准，所有患者均在治疗前签署知情同意书。

1.2 临床资料收集 基线数据包括人口统计学(年龄、性别)、既往病史；人口统计学及既往病史从电子病历里获得。并于入院后由神经内科医生评估并记录患者的入院NIHSS评分。恶性脑水肿定义为血管内治疗后72h内神经功能恶化或意识水平下降，并头颅CT或MRI显示脑梗死范围超过1/2大脑中动脉供血区伴中线移位>5mm^[9]。由2名具有6年神经诊断经验的放射学医师在不知道临床信息的情况下独立评估影像资料，存在分歧时进行

【第一作者】童俊，男，主管技师，主要研究方向：神经影像方面。E-mail: 418908226@qq.com

【通讯作者】姜海龙，男，主管技师，主要研究方向：神经影像方面。E-mail: jianghailong200805@163.com

讨论并由另一名具有10年神经诊断经验放射学医师共同协定。为防止模型存在过拟合,在样本选择时根据入院时间顺序分别收集恶性脑水肿患者64例和无恶性脑水肿患者64例,以确保样本均衡。

1.3 磁共振扫描参数 采用磁共振成像仪(Philips Ingenia 3.0T, Netherlands)进行扫描,扫描序列包括DWI及PWI序列,扫描参数如下: DWI采用自旋回波序列,TR=2501ms,TE=98ms,FA=90°,视野=230mm×230mm,矩阵=152×122,层厚6mm,18层,层间距1.3mm,b=0、1000s/mm²,扫描时间43s; PWI采用平面回波序列,TR=2000ms,TE=30ms,矩阵=96×93,视野=224mm×224mm,FA=90°,层厚4mm,扫描时间88s。

1.4 影像资料收集 收集患者血管内治疗前的多模态MRI数据,包括DWI梗死体积、Tmax>6s体积、DWI-PWI不匹配体积(Tmax>6s体积减去DWI梗死体积)。DWI梗死体积、Tmax>6s体积、PWI-DWI不匹配体积均由RAPID软件自动生成。

1.5 影像组学特征提取及筛选

1.5.1 图像分割 应用ITK-SNAP软件(www.itksnap.org, 版本号3.2)进行图像分割,具体步骤如下: 由1名具有6年神经影像诊断经验的放射学医师在DWI图像上的急性梗死区(DWI图上为高信号、表观弥散系数图像上为低信号)、PWI灌注异常区(Tmax>6s区域)进行逐层勾画,获得三维感兴趣区,勾画完成后由另外1名具有10年神经影像诊断经验的放射学医师进行核对,对存在争议的VOI由两名医师共同协商后确定。

1.5.2 特征提取 应用A.K.软件(美国GE Healthcare, 版本号1.0.3)自动提取VOI图像中的影像组学特征,这些特征包括^[10]: (1)一阶统计特征: 如均数、中位数、最大值、最小值、标准差等。(2)二阶统计特征(即纹理特征): 包括灰度级长矩阵(gray level run-length matrix, GLRLM)、灰度相关矩阵(gray level dependence matrix, GLDM)、灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)、邻域灰度差分矩阵(neighborhood gray-tone difference matrix, NGTDM)和灰度级带矩阵(gray level size zone matrix, GLSZM)等特征。(3)高阶统计特征: 主要包括经gabor滤波器变换后所得到的图像的强度和纹理特征。DWI和Tmax图像各提取792个特征,即每个患者共获得1584个特征。

1.5.3 特征选择 通过删除类似复杂且多余数据,筛掉其他不符合特征,进行计算效率得到一定的提高,对过度拟合得到有效的预防。本研究首先采用t检验从所有特征中筛选出具有统计学意义的特征(P<0.05)。然后,进一步采用单因素Logistic回归、多因素Logistic回归和最低绝对收缩与选择算法(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)进行特征筛选、降

维。对于LASSO算法中的调谐参数,本研究通过十倍交叉验证,利用做小标准和最小标准的1倍标准误差(1-SE准则)进行选择。为了降低模型过拟合的风险,根据1倍标准误差对应的log()筛选掉其对应的系数为零的特征,保留有显著统计学意义和鲁棒性强的特征。进而计算每位患者的影像组学评分(Radscore)。

1.6 模型的构建 应用logistic回归分类器,基于筛选出的影像组学特征获得每位患者恶性脑水肿的预测概率。联合预测概率及临床相关预测因子构建恶性脑水肿风险列线图模型。计算每位患者的预测评分。

1.7 统计方法分析 临床资料使用SPSS26.0软件进行统计、分析。采用Kolmogorov-Smirnov检验资料是否符合正态分布,对符合正态分布的计量资料以平均数±标准差(mean±SD)表示,并用独立样本t检验分析,对于非正态分布的计量资料以中位数(四分位数)[M(P25, P75)]表示,并用Mann-Whitney U检验;计数资料以百分数表示并采用卡方检验分析。所有检验为双边检验,P<0.05表示有统计学差异。将有统计学差异的临床变量及筛选出的最佳影像组学特征共同纳入列线图模型。应用Sklearn (<http://scikit.learn.org/stable/>)机器学习模块的ROC曲线分析评估模型预测急性卒中恶性脑水肿风险的预测效能。

2 结果

2.1 恶性脑水肿组与无恶性脑水肿组基线资料比较 共128例接受血管内治疗的急性卒中患者纳入分析,90例训练集患者中恶性脑水肿为48例(53.33%),38例测试集患者中恶性脑水肿为16例(42.11%),两组间恶性脑水肿比例无明显差异(P=0.246)。与无恶性脑水肿组相比,恶性脑水肿组年龄(67.16±13.28 VS 73.69±11.56; P=0.004)、入院NIHSS评分(7(4, 12) VS 10(5, 16); P=0.007)、DWI梗死体积(21.32±15.41 VS 39.25±18.43; P<0.001)、Tmax>6s体积(66.56±27.16 VS 82.19±28.04; P=0.002)明显较高,差异均有统计学意义(见表1)。两组间其余基线资料无明显差异(P>0.05)(见表1)。

2.2 影像组学特征筛选 1584个影像组学特征,通过降维筛选后共获得10个与恶性脑水肿密切相关的影像组学特征,包括6个DWI图像特征(2个一阶特征、3个GLCM特征和1个GLSZM特征)和4个PWI图像特征(1个形态学特征、2个GLCM特征和1个GLSZM特征)。LASSO热图见图1。基于这10个最佳影像组学特征和其相应的回归系数获得影像组学标签评分(Rad_score)。

2.3 急性卒中恶性脑水肿列线图预测模型的构建 ROC曲线分析显示上述临床危险因素(年龄、入院NIHSS评分、DWI梗死体积、Tmax>6s体积)及影像组学预测概率构建急性卒中恶性

表1 急性卒中患者恶性脑水肿与无恶性脑水肿组基线资料比较

变量	无恶性脑水肿(n=64)	恶性脑水肿(n=64)	t/χ ² 值	P值
男性[n(%)]	37(57.81%)	32(50.00%)	0.786	0.375
年龄[mean±SD]	67.16±13.28	73.69±11.56	0.103	0.004*
发病时间[h, mean±SD]	3.02±2.83	3.70±3.36	-1.225	0.223*
入院NIHSS评分[M(P25, P75)]	7(4, 12)	10(5, 16)	-2.727	0.007*
高血压[n(%)]	49(76.56%)	52(81.25%)	0.422	0.665
糖尿病[n(%)]	15(23.44%)	20(31.25%)	0.983	0.321
吸烟史[n(%)]	11(17.19%)	16(25.00%)	1.173	0.386
高脂血症[n(%)]	12(18.75%)	15(23.44%)	0.422	0.516
房颤[n(%)]	9(14.06%)	13(20.31%)	0.878	0.349
高同型半胱氨酸	8(12.50%)	10(15.63%)	0.259	0.611
DWI梗死体积, mL	21.32±15.41	39.25±18.43	-5.974	<0.001*
Tmax>6s体积, mL	66.56±27.16	82.19±28.04	-3.202	0.002*
DWI-PWI不匹配体积, mL	45.25±21.60	42.94±23.84	0.574	0.567

脑水肿的列线图模型，预测训练集患者恶性脑水肿风险的AUC为0.959，敏感度和特异度分别为0.906、0.938，准确度为0.933；预测测试集患者恶性脑水肿风险的AUC为0.889，敏感度和特异度分别为0.953、0.850，准确度为0.842(见表2，图2)。联合上述临床危险因素(年龄、入院NIHSS评分、DWI梗死体积、Tmax>6s

体积)及影像组学预测概率构建卒中恶性脑水肿的列线图模型，分别对各最佳预测因子进行赋分，总分越高，恶性脑水肿几率越高(见图3)，一致性指数为0.913(95%CI: 0.881~0.942, P<0.01)，表明该列线图对急性脑卒中恶性脑水肿的发生具有较高的预测价值。

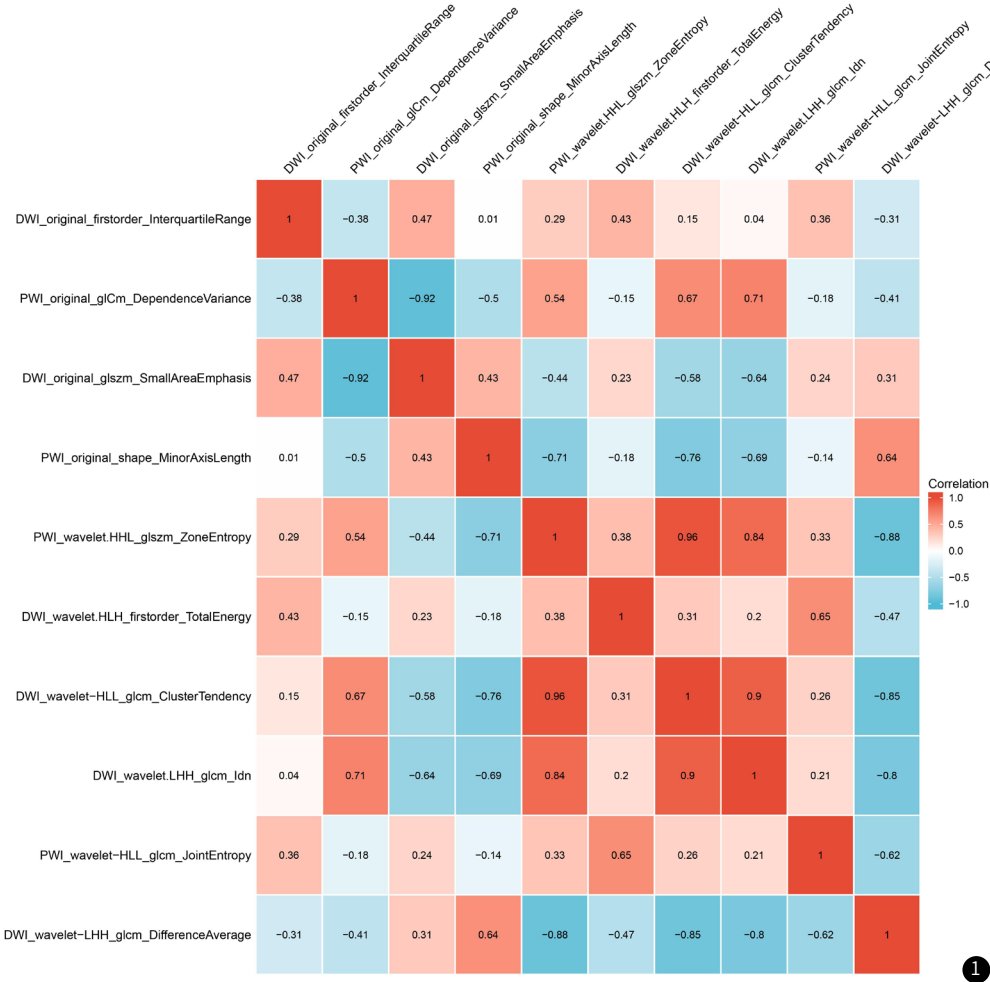


图1 影像组学特征的LASSO热图

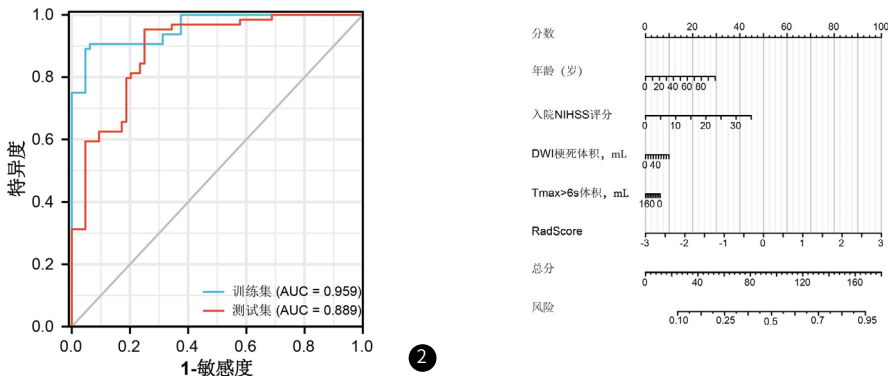


图2 基于联合标签预测急性卒中血管内治疗后恶性脑水肿风险的受试者工作特征曲线。图3 急性卒中血管内治疗后恶性水肿风险的列线图。

表2 卒中血管内治疗后恶性脑水肿预测模型效能

	准确度	敏感度	特异度	阳性预测值	阴性预测值	AUC
训练集	0.933	0.906	0.938	0.935	0.909	0.959
测试集	0.842	0.953	0.850	0.892	0.941	0.889

3 讨论

尽管近年来血管内治疗的技术取得了进展,但是在治疗的过程中,恶性脑水肿作为大面积半球脑梗死的毁灭性并发症,仍然是一个严重的临床问题,其病死率可高达40%~78%^[10-11]。恶性脑水肿主要表现为神经功能缺损急剧恶化,迅速发展为大面积脑肿胀、脑疝,最终导致残疾甚至死亡的恶性过程。因此,尽早准确的预测发生恶性脑水肿高风险的患者,对于密切监测和进行去骨瓣减压术至关重要。然而,恶性脑水肿的发病机制复杂,影响因素较多,目前仍存在争议。

临床分析发现,患者入院NIHSS评分与恶性脑水肿发生密切相关^[5],与本研究结果一致。患者入院NIHSS评分是评定脑卒中神经缺损程度的量表,评分越高,说明其神经功能缺损越严重,脑组织缺血缺氧越严重,其耐受力更差,从而极易导致恶性脑水肿的发生。大量研究表明^[13-15],年龄是卒中最重要的危险因素。Long等^[15]研究发现,即使调整了卒中亚型、严重程度和危险因素,年龄和预后之间的关系仍然存在。本研究结果显示,恶性脑水肿组的年龄明显高于无恶性脑水肿组。由于大脑微环境中与年龄相关的变化,老年患者身体机能退化,可能对卒中的治疗反应及预后产生负面的影响^[16]。此外,本研究还分析了多模态MRI在恶性脑水肿预测中的价值,本研究结果显示DWI梗死体积、Tmax>6s体积与恶性脑水肿的发生密切相关。以往的研究多为基于CT预测恶性脑水肿^[17-18]。Wu等^[3]研究显示CT图像上较大的低密度实质影可准确预测恶性脑水肿,提示恶性水肿的发生与脑梗死病变密切相关。然而,由于急性期脑梗死在CT图像上显示不敏感,而基于DWI脑梗死体积可能更好的预测卒中恶性脑水肿的发生。恶性脑水肿的发病机制主要为缺血缺氧造成脑组织损伤后,细胞膜上的离子泵功能破坏,使渗透性增加,导致神经元细胞内积聚钠和其他离子,进而引发细胞肿胀,细胞外间隙缩小,最终使脑容量增大^[19-20]。本研究中DWI梗死体积、Tmax>6s体积在恶性脑水肿和无恶性脑水肿组间存在明显差异,表明DWI梗死体积、Tmax>6s体积均在恶性脑水肿的预测中具有重要作用。

然而,恶性脑水肿的影响因素复杂,仅依靠临床、传统影像学特征预测恶性脑水肿存在一定的局限性,将其应用于临床评估仍存在争议。近年来,人工智能的发展为临床精准诊疗提供了契机,尤其是影像组学和机器学习技术,在应用放射影像指导临床治疗方案的制定中已广泛应用。影像组学为从影像成像中提取临床相关信息提供了强有力的工具,它可提取高通量的特征来预测患者的并发症或预后,使用大型训练样本来探究图像特征和疾病状态之间的微妙关系^[21-22]。本研究经特征筛选及降维后获得了10个与恶性脑水肿密切相关的影像组学特征,包含了1个形态学特征、2个一阶特征和7个纹理特征。形态特征可体现感兴趣区的形态、面积或体积变化,能更直观的显示病灶微观结构改变,纹理特征可反映病变的同、异质性。这些特征较传统的梗死体积及Tmax>6s体积可为恶性水肿发生的预测提供更多信息。基于以上临床危险因素、传统影像学特征及影像组学特征进一步进行机器学习分类预测,结果显示基于临床危险因素(年龄、入院NIHSS评分、DWI梗死体积、Tmax>6s体积)及影像组学预测概率构建卒中恶性脑水肿的列线图模型,预测训练集及测试集患者恶性脑水肿风险的敏感度和特异度均较高。承军等^[5]基于临床参数的Logistic回归模型预测恶性水肿的AUC为0.816,XGBoost算法模型的AUC为0.856。本研究结果优于以为的研究,且本研究的模型仅基于治疗前临床特征及MRI的特征即可获得较高的准确度,无需比较治疗前后的变化,可减少患者的检查次数。此外,基于这些因素构建的恶性脑水肿列线图预测模型,可帮助临床医生在血管内治疗时更好地对患者和家属进行沟通,并指导临床治疗方案的选择。

本研究仍存在一定的不足之处。本研究为回顾性研究,由于恶性脑水肿发生的比例不高,为使两组样本均衡,防止模型过拟合,在样本选择时可能存在偏倚。其次,本研究为单中心研究,

后续需进行外部数据集验证模型的泛化能力。

综上所述,由年龄、入院NIHSS评分、DWI梗死体积、Tmax>6s体积及影像组学标签构成的列线图对急性脑卒中患者血管内治疗后恶性脑水肿的风险具有一定的预测价值,该列线图有利于临床医生在治疗前更好的评估、预测。

参考文献

- [1] Powers W J, Rabinstein A A, 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(12): e344-e418.
- [2] Huang X, Yang Q, Shi X, et al. Predictors of malignant brain edema after mechanical thrombectomy for acute ischemic stroke[J]. J Neurointerv Surg. 2019, 11(10): 994-998.
- [3] Wu S, Yuan R, Wang Y, et al. Early prediction of malignant brain edema after ischemic stroke[J]. Stroke. 2018, 49(12): 2918-2927.
- [4] Foroushani H M, Hamzehloo A, Kumar A, et al. Quantitative serial CT imaging-derived features improve prediction of malignant cerebral edema after ischemic stroke[J]. Neurocrit Care. 2020, 33(3): 785-792.
- [5] 承军, 李虎, 黄晓成, 等. 急性前循环大血管闭塞性卒中血管再通后恶性脑水肿发生的预测模型[J]. 国际外科学杂志, 2022, 49(1): 15-23, F3.
- [6] 张艳波, 宋志成, 史丽杰. 多模态MR在急性缺血性脑卒中中的应用研究[J]. 中国CT和MRI杂志. 2020, 18(5): 66-68.
- [7] 王秀芬, 李劲松, 高维健. 多模式MRI对急性缺血性脑卒中静脉溶栓治疗指导的临床价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(6): 22-24.
- [8] Chen Q, Xia T, Zhang M, et al. Radiomics in stroke neuroimaging: techniques, applications, and challenges[J]. Aging Dis. 2021, 12(1): 143-154.
- [9] 苏思宇, 罗敏, 冯福婷, 等. 急性缺血性脑卒中血管内治疗后恶性脑水肿发生的影像学预测因素分析[J]. 实用医院临床杂志, 2021, 18(4): 223-226.
- [10] 刘振, 黄晓斌, 彭明洋, 等. 急性脑卒中机械取栓术后出血转化风险的列线图模型构建[J]. 磁共振成像, 2022, 13(4): 15-19.
- [11] Pastuszak Z, Czernicki Z, Koszewski W, et al. Malignant middle cerebral artery (MCA) infarction in people over 85 years old - Diagnosis, management and risk factors[J]. Neurol Neurochir Pol. 2018, 52(3): 311-317.
- [12] Pallesen LP, Barlinn K, Puetz V. Role of decompressive craniectomy in ischemic stroke[J]. Front Neurol. 2019, 9: 1119.
- [13] Griessenauer CJ, Farrell S, Sarkar A, et al. Genetic susceptibility to cerebrovascular disease: A systematic review[J]. J Cereb Blood Flow Metab. 2018, 38(11): 1853-1871.
- [14] 董玉茹, 王胜, 马沛沛, 等. 基于高分辨核磁共振血管成像技术的急性卒中患者颅内动脉狭窄特征分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(9): x28-30.
- [15] Long X, Lou Y, Gu H, et al. Mortality, recurrence, and dependency rates are higher after acute ischemic stroke in elderly patients with diabetes compared to younger patients[J]. Front Aging Neurosci. 2016, 8: 142.
- [16] Miao J, Shen LH, Tang YH, et al. Overexpression of adiponectin improves neurobehavioral outcomes after focal cerebral ischemia in aged mice[J]. CNS Neurosci Ther. 2013, 19(12): 969-977.
- [17] Dhar R, Chen Y, Hamzehloo A, et al. Reduction in cerebrospinal fluid volume as an early quantitative biomarker of cerebral edema after ischemic stroke[J]. Stroke. 2020, 51(2): 462-467.
- [18] Chen Y, Dhar R, Heitsch L, et al. Automated quantification of cerebral edema following hemispheric infarction: Application of a machine-learning algorithm to evaluate CSF shifts on serial head CTs[J]. Neuroimage Clin. 2016, 12: 673-680.
- [19] Kimberly W T. Predicting malignant cerebral edema after large hemispheric stroke[J]. Neurocrit Care. 2020, 32(1): 84-85.
- [20] Rumalla K, Ottenhausen M, Kan P, et al. Recent nationwide impact of mechanical thrombectomy on decompressive hemicraniectomy for acute ischemic stroke[J]. Stroke. 2019, 50(8): 2133-2139.
- [21] 金玉梅, 王叶武, 张军, 等. 影像组学在混合型肝癌与肝内胆管细胞癌鉴别诊断中的价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(11): 118-122.
- [22] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics[J]. J Nucl Med. 2020, 61(4): 488-495.

(收稿日期: 2022-03-14)

(校对编辑: 阮靖)