中枢神经影像学

基于全肿瘤区域 MRI 纹理分析鉴别肺癌脑转移瘤病理类型的 研究

李瑞,葛亚琼,张明珠,郑星星,冯峰

【摘要】目的:探讨 MRI 增强 T₁ 加权成像(CE-T₁WI)、液体衰减反转恢复序列(FLAIR)及表观 扩散系数(ADC)纹理特征在肺腺癌及非腺癌脑转移瘤中的鉴别价值。方法:回顾分析经手术病理或影 像随诊证实的脑转移瘤病灶 127 个,其中腺癌 68 个,非腺癌 59 个(鳞癌 21 个,小细胞肺癌 38 个)。利 用 ITK-SNAP 3.8.0 软件分别在磁共振成像 CE-T₁WI、FLAIR 及 ADC 图上绘制肿瘤全体积的兴趣区 (3D ROI),使用人工智能工具包(A.K)分析提取出纹理特征,共 394 个纹理特征。采用多因素 logistic 回归分析确定可以作为病理分型的最佳预测因素,并构建基于纹理分析的预测模型,采用受试者操作特 征曲线(ROC)评价其诊断效能。结果:基于 ADC 图、CE-T₁WI 及 FLAIR 的纹理分析模型用于鉴别腺 癌与非腺癌脑转移瘤的 ROC 曲线下面积(AUC)分别为 0.87、0.81 及 0.64,联合三种序列构建预测模型 的 AUC 值为 0.89。结论:基于脑转移瘤的 ADC 图、CE-T₁WI 及 FLAIR 的纹理分析模型有助于鉴别肺 部原发病灶病理类型(腺癌与非腺癌),三种序列联合分类预测模型诊断效能最佳。

【关键词】 脑转移瘤;磁共振成像;肺肿瘤;纹理分析;鉴别诊断

【中图分类号】R445.2;R734.2 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2021)02-0176-05 DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.02.006 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Identification of pathological types of brain metastasis from lung cancer based on whole tumor region MRI texture analysis LI Rui, GE Ya-qiong, ZHANG Ming-zhu, et al. Cancer Hospital Affiliated to Nantong University, Jiangsu 226000, China

[Abstract] Objective: To investigate the differential value of texture features extracted from contrast-enhanced T₁-weighted images (CE-T₁ WI), fluid attenuated inversion recovery sequence (fluid attenuated inversion recovery, FLAIR) and apparent diffusion coefficient (apparent diffusion coefficient, ADC) images in differentiating between lung adenocarcinoma and non-adenocarcinoma brain metastases. Methods: 127 brain metastases lesions confirmed by either pathology or follow-up imaging were retrospectively analyzed, including 68 adenocarcinoma lesions and 59 non-adenocarcinoma lesions (21 squamous cell carcinoma and 38 small cell lung cancer). The whole volume region of interest (3D ROI) of the tumor was drawn on CE-T₁ WI, FLAIR images and ADC maps using ITK-SNAP 3.8.0 software, and a total of 394 texture features were extracted by using the artificial intelligence Kit (A.K) software.Multivariate logistic regression analysis was used to determine the best predictor of pathological classification, and a prediction model based on texture analysis was constructed. Receiver operating characteristic curve (ROC) was used to evaluate the diagnostic efficiency. **Results**: The area under the curves (AUCs) of the texture analysis model based on ADC, CE-T₁WI and FLAIR images in differentiating adenocarcinoma from non-adenocarcinoma brain metastases were 0.87,0.81 and 0.64 respectively. The AUC value of the prediction model combining the three sequences was 0.89. Conclusion: The texture analysis model based on ADC, CE-T, WI and FLAIR images is helpful to distinguish the pathological types of brain metastases from primary lung cancers (adenocarcinoma and non-adenocarcinoma), and the classification and prediction model combining the three sequences had the best performance.

作者单位:226000 江苏,南通大学附属肿瘤医院(李瑞、张明珠、郑星星、冯峰);210000 上海,GE医疗上海(葛亚琼) 作者简介:李瑞(1995-),女,安徽六安人,硕士研究生,主要从事影像学诊断和研究工作。

通讯作者:冯峰,E-mail:drfengfeng@163.com

基金项目:江苏省自然科学基金面上项目(BK20161291);南通市科技局基础研究项目(JC2018027);2019 年度南通市第五期 226 工程"科研项目

(Key words) Brain metastases; Magnetic resonance imaging; Lung neoplasms; Texture Analysis; Differential diagnosis

脑转移瘤是中枢神经系统最常见的肿瘤,约9% ~50%的恶性肿瘤患者会发生脑转移^[1],其中以肺癌 最为多见,肺癌最常见的组织学亚型为腺癌,而非腺癌 诸如小细胞肺癌、鳞癌等也常发生脑转移。如果脑转 移瘤的影像学特征可以帮助确定原发性恶性肿瘤或缩 小鉴别诊断范围,将会对临床诊断及治疗策略的制定 有所帮助。MRI 是脑转移瘤最常用的诊断方法,由于 常规 MR 图像(如位置、形状、环形增强)的典型征象 评估存在很强的观察者间和观察者内差异[2],并且难 以识别转移瘤病理类型[3],因此需要额外的成像和有 创活检来进行更明确的诊断。近年来,影像组学弥补 了上述不足。纹理分析是最常用的影像组学方法,它 可以对图像像素及其排列方式的细微变化进行客观、 定量测量,利用大量的特征提取与机器学习技术结合 获得可靠的诊断[4],且不依赖放射科医师的主观评价, 反映了肿瘤在病理和组织学水平的空间变异,包括瘤 内细胞结构、血管生成、细胞外基质和坏死区域等^[5]。 目前,纹理分析逐渐应用于多种肿瘤的鉴别、分级及预 后评估[6-8],但在脑转移中的应用较少。本研究应用纹 理分析,在磁共振增强 T₁ 加权像(contrast enhanced T₁-weighted images, CE-T₁WI)、液体衰减反转恢复 序列(fluid attenuated inversion recovery, FLAIR)及 表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)序 列上进行肿瘤全体积异质性分析,探究肺腺癌及非腺 癌脑转移瘤异质性与病理类型的关系。

材料与方法

1. 临床资料

搜集 2012 年 3 月 - 2020 年 5 月行常规磁共振 CE-T₁WI、FLAIR 及扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)检查,并经手术病理或影像随诊证 实的肺癌脑转移瘤患者 93 例,其中腺癌 53 例,非腺癌 40 例(其中鳞癌 17 例、小细胞肺癌 23 例),男性 65 例,女性 28 例,年龄 34~81 岁,中位年龄 64 岁。人组 标准:①有明确原发灶病理类型;②检查前均未接受脑 部放化疗及手术治疗;③CE-T₁WI、FLAIR 及 ADC 图 像无明显伪影,满足诊断要求。最终入组病灶总数 127 枚,其中腺癌 68 枚,非腺癌 59 枚。

2. 检查方法

采用 Siemens Magnetom Espree 1.5T 超导型磁 共振扫描仪,采用 8 通道标准头颈联合线圈。扫描序 列及参数:横轴面 T₁WI(TR 218 ms, TE 4.76 ms, FOV 230 mm×208.38 mm,矩阵 320×252.8,层厚 5 mm), CE-T₁WI采用高压注射器注射对比剂 Gd-DTPA(拜尔先灵药业, 广州), 剂量 0.2 mmol/kg, 注 射流率为 2.0 mL/s, 紧接着注射生理盐水 20 mL 冲 管。FLAIR 序列(TR/TE = 7500 ms/84 ms, FOV 230 mm×201.25 mm, 矩阵 192×172.8, 层厚 5 mm), DWI(TR/TE: 3900 ms/106 ms; FOV 230 mm× 230 mm; 矩阵 128×128; b=0,1000 s/mm², X、Y、Z 轴 3 个扩散方向, 层厚 5.0 mm)。图像以 DICOM 格 式导出。

3. 图像处理

将常规 CE-T₁WI 图像、FLAIR 图像及 b 值为 1000 s/mm²的 ADC 图像、传至免费开源软件 ITK-SNAP 3.8.0(http://www.itksnap.org/),由两位具有 6 年 MRI 诊断经验医师取得一致意见后,分别在每个 序列上的每个层面手动勾画整个肿瘤(包括任何囊性、 坏死、出血性区域)三维兴趣区(three-dimensional region of interest, 3D ROI),其中 ADC 图像 3D ROI 的 勾画对照 CE-T₁WI 及 FLAIR。具体方法为:利用 ITK-SNAP 3.8.0 软件将 ADC 图与 CE-T₁WI 及 FLAIR 图相同层面显示,根据 FLAIR 序列上病灶区 域及 CE-T₁WI 图像上病灶的强化区域在 ADC 图上 勾画靶区,范围尽可能与 CE-T₁WI 一致。最后,采用 人工智能工具包(Artificial Intelligence Kit, A.K)(GE healthcare, version 3.2.0)自动分析提取出 394 个纹理 特征。

4. 统计学方法

采用 R 软件(version 3.5.1:www.R-project.org) 进行统计学分析。采用 Mann-Whitney U 检验比较 ADC、CE-T₁WI及FLAIR 序列纹理特征在不同病理 类型肺癌(腺癌与非腺癌)脑转移瘤之间的差异,以 P<0.05 为差异具有统计学意义。将这些特征进行单 因素 logistic 回归分析,其中 OR 值(odds ratio)用以 说明某一特征下疾病的发生率,等于1代表该特征与 疾病的发生没有关联,大于1代表该特征值越大越可 能发生这一疾病,反之亦然。最后将 P<0.1 的特征 值放入多因素 logstic 回归模型,得到用于肺部原发肿 瘤病理分型的纹理分析预测模型[9-10]; P < 0.05 的特 征被认为是独立预测因子。采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析其预测 效能。考虑到病灶纹理分析只有训练集没有验证集, 因此采用 boot632 法进行重采样,以 7:3 将队列随机 分为训练组及验证组,进行100重复验证分析。

1. 肺腺癌与非腺癌脑转移瘤纹理特征的差异

肺腺癌与非腺癌脑转移瘤两组间共有 137 个 ADC 纹理特征、93 个 CE-T₁WI 纹理特征、8 个 FLAIR 纹理特征以及 152 个 ADC/FLAIR/CE-T₁WI 联合组(Combined 组)特征差异有统计学意义(P < 0.05)。

2. 构建区分腺癌与非腺癌脑转移瘤的纹理分析 预测模型

首先将差异具有统计学意义的特征参数行单因素 logistic 回归分析,137 个 ADC 纹理特征参数中共有 77 个有统计学意义(P<0.1);93 个 CE-T₁WI 纹理特 征中共有 56 个具有统计学意义(P<0.1);8 个 FLAIR 纹理特征中共有 2 个具有统计学意义(P< 0.1);152个 Combined 组纹理特征中有 7个具有统计 学意义(P<0.1)。对上述有统计学意义的特征参数 (ADC 组、CE-T₁WI 组 FLAIR 组及 Combined 组)进 行多元 logistic 回归分析(后退式),得到纹理分析预 测模型,其最终包含的特征参数汇总至表 1。

3. 四种模型鉴别肺腺癌及非腺癌脑转移瘤的 效能

ROC 曲线用于评价基于 ADC、CE-T₁WI 及 FLAIR 序列纹理特征的预测模型在区分肺腺癌与非 腺癌脑转移瘤中的诊断效能,结果发现三种方法所得 到的预测模型都有一定的鉴别能力,其曲线下面积 (area under curve,AUC)分别为 0.87(95%CI:0.79~ 0.92)、0.81(95%CI:0.73~0.88)及 0.64(95%CI: 0.55~0.72),联合三种序列纹理分析诊断效能最高, 其 AUC 为 0.89(95%CI:0.83~0.94),见图 1。最后采

表1 鉴别肺腺癌与非腺癌脑转移瘤纹理分析预测模型所含特征

纹理特征	偏回归系数	OR(95%CI)	P值 0.02	
ADC 纹理特征(Intercept)	0.725030936292934	2.06(1.17~4.49)		
ADC_Correlation_angle135_offset1	1.16834637542315	3.22(1.63~7.24)	0.00	
ADC_ClusterProminence_AllDirection_offset1	0.98113781194206	2.67(0.86~8.84)	0.10	
ADC_Percentile5	2.68772626878915	14.70(3.03~100.50)	0.00	
ADC_ShortRunHighGreyLevelEmphasis_AllDirection_offset4_SD	1.70939870769721	5.53(1.20~70.55)	0.07	
ADC_Range	-0.896457861864219	0.41(0.17~0.92)	0.04	
ADC_skewness	-2.00670761452842	0.13(0.04~0.39)	0.00	
ADC_Percentile25	-1.69137585635506	0.18(0.03~0.86)	0.05	
ADC _ LongRunHighGreyLevelEmphasis _ angle0 _ offset1	-1.02337166401442	0.36(0.12~0.78)	0.02	
CE-T ₁ WI 纹理特征(Intercept)	0.725030936292934	0.04 (0.00~0.42)	0.01	
$T_1WI_HighGreyLevelRunEmphasis_AllDirection_ offset4_SD$	0.603743446119302	1.83 (1.03~3.48)	0.05	
T_1 WI_Correlation_angle135_offset7	39.1519085311608	$1.01E + 17(178790.61 \sim 1.56E + 30)$	0.01	
T ₁ WI_ShortRunHighGreyLevelEmphasis_angle135 _offset1	-13.3244212794561	0.00(0.00~4.69)	0.09	
$T_1 WI_InverseDifferenceMoment_AllDirection_off-set7$	1.37514451935907	3.96(1.22~15.31)	0.03	
$T_1 WI_InverseDifferenceMoment_angle45_offset7$	-1.9004415483008	0.15(0.02~0.61)	0.03	
T_1 WI_SurfaceArea	-0.647400491807046	0.52 (0.23~1.01)	0.08	
$T_1 WI_LongRunHighGreyLevelEmphasis_angle135_ offset1$	-5.02318408986237	0.01 (0.00~0.64)	0.04	
$T_1 WI_HaralickCorrelation_AllDirection_offset7$	-1.48626265437138	0.23(0.04~1.04)	0.06	
$T_1 WI_HaralickCorrelation_angle0_offset1$	2.02004782662769	7.54(1.60~42.54)	0.01	
$T_1 WI_ShortRunHighGreyLevelEmphasis_angle90_ offset4$	18.5743740969451	1.17E+08(2.93~2.58E+16)	0.04	
FLAIR 纹理特征(Intercept)	0.143255243290609	1.15 (0.81~1.65)	0.43	
Flair_Range	-0.335282779911336	0.72(0.48~1.03)	0.08	
$Flair_ShortRunEmphasis_angle 45_offset 7$	0.340043980674554	1.41(0.98~2.05)	0.07	
Combined 组纹理特征(Intercept)	-3.65609195754483	0.03(0.00~0.36)	0.01	
ADC_histogramEnergy	2.11201730462286	8.26(3.01~74.59)	0.00	
$T_1WI_HighGreyLevelRunEmphasis_AllDirection_offset4_SD$	0.584475632471897	1.79(0.94~4.18)	0.12	
ADC_SurfaceVolumeRatio	0.809169884545687	2.25 (1.10~6.12)	0.05	
$T_1WI_Correlation_angle135_offset7$	35.681362547732	3.13E+15(3293.80~6.90E+28)	0.02	
ADC_Quantile0.025	-0.734817953666896	0.48(0.25~0.82)	0.01	
T ₁ WI InverseDifferenceMoment angle45 offset7	-1.1033491766413	$0.33(0.08 \sim 1.06)$	0.08	



图 1 ADC、CE-T₁WI、FLAIR 序列及联合序列 (Combined)所得纹理分析预测模型鉴别肺腺癌与非 腺癌脑转移瘤的 ROC 曲线。

用 boot632 的重采样方法进行 100 次重复验证分析, 分析模型的敏感度、特异度及符合率的平均值见表 2。 表 2 boot632 重采样方法进行 100 次重复交叉验证所得诊断效能平均值

预测模型	符合	符合率		敏感度		特异度	
	训练组	验证组	训练组	验证组	训练组	验证组	
ADC	0.876	0.785	0.883	0.883	0.871	0.871	
$CE-T_1WI$	0.830	0.730	0.836	0.836	0.825	0.825	
FLAIR	0.637	0.594	0.688	0.688	0.594	0.594	
Combined	0.901	0.813	0.873	0.873	0.925	0.925	

讨论

本研究结果显示磁共振 ADC、CE-T₁WI 及 FLAIR 序列纹理分析预测模型均有助于鉴别脑转移 瘤肺部原发病灶病理类型(肺腺癌与非腺癌)(AUC 均 >0.60),这可能与肺癌病理类型不同导致的肿瘤的生 物学特征差异较大有关。肺腺癌细胞可以分泌管腔或 细胞质空泡粘蛋白,具有腺泡/管状、乳头状或微乳头 状分化的组织学特征,而其他肺癌病理类型则少有此 特点,如小细胞肺癌肿瘤细胞形态小,呈弥漫或片状分 布,细胞质稀少,边界模糊,肺鳞癌以细胞间桥或角蛋 白形成为特征。以上病理特征也为本研究采用纹理分 析预测模型评价肿瘤异质性鉴别脑转移瘤肺部原发病 灶不同病理类型奠定了基础。

在本研究单一序列中,从 ADC 图像中提取的纹 理特征构建的预测模型具有更高的诊断效能。DWI 序列是目前唯一能够检测活体组织内水分子扩散运动 的无创方法,可间接反映组织微观结构特点及其变化, 相关研究表明,ADC 值和肿瘤的胞质具有很好的相关 性^[11]。ADC 图基于 DWI 序列图像生成,采用 ADC 图进行纹理分析在鉴别脑转移瘤肺部原发病灶不同病 理类型中展现了较好的前景。熊飞等^[12]根据 ADC 图 的直方图特征(一阶特征)对腺癌及鳞癌脑转移瘤进行 鉴别,发现 ADCmin 阈值为 0.600×10⁻³ mm²/s 时,诊 断效能最佳,AUC为0.70,诊断敏感度为64.7%,特异 度为 74.2%。本研究发现利用 ADC 图像上获取的直 方图联合肿瘤高阶纹理特征对不同病理类型肺癌脑转 移瘤进行鉴别时,所得结果的诊断效能更高。其原因 可能是相比于一阶的直方图特征,采用直方图联合形 态特征、GLCMS 及 GLCM 高阶纹理参数表征了体素 与其邻域之间的关系,反映了图像分布的均匀性和灰 度特征的粒度,更能反映肿瘤的异质性,因此鉴别效能 更高。就纹理参数而言,本研究全病灶纹理分析显示 上述参数中的百分位数(Percentile)、相关性(Correlation)、能量(Energy)、短行程高灰度优势(Short Run High Grev Level Emphasis)及长行程高灰度优势 (Long Run High Grey Level Emphasis)等参数是不 同病理类型肺癌脑转移瘤之间的鉴别要点。其中百分 位数、相关性及能量是一阶特征,用来描述图像区域内 体素(体积元素)强度的分布,而短行程高灰度优势及 长行程高灰度优势可以反映出灰度分布的空间信息。

本研究显示 CE-T₁WI 纹理分析预测模型在鉴别 脑转移瘤不同病理类型原发病灶效能尚可(AUC为 0.81),可能是因为 CE-T₁ WI 可以很好的显示脑转移 瘤边缘区域,且CE-T₁WI图像的纹理分析主要是基 于肿瘤强化程度、灌注信息导致的信号变化,因此可以 反映肿瘤血供的非均质性特点^[13]。Li 等^[14]的研究也 证明了 CE-T₁WI 纹理分析与原发性肺恶性肿瘤脑转 移的病理类型有关,其诊断效能优于 DWI 序列纹理分 析。这一研究结果与本研究 ADC 图纹理分析模型优 于 CE-T₁WI 有所不同,其原因可能是 Li 等^[14]勾画病 灶 ROI 是基于肿瘤的最大截面且避开了囊变坏死区 域,而本研究考虑到肿瘤的坏死囊变是脑转移瘤发生 发展过程中异质性表现之一,且可以提供丰富的肿瘤 分化信息,因此采用肿瘤全体积 ROI 纹理分析,所得 结果充分反映了脑转移瘤的异质性,也获得了比 CE-T₁WI更高的鉴别肺部原发病灶病理类型的诊断效 能。

很多研究都是从 MRI 单一序列中获取组学参数 来评估肿瘤细胞数量、坏死等。在本研究中,不仅使用 CE-T₁WI 和 ADC 图,而且还使用了 FLAIR 序列。 FLAIR 序列反映了脑转移瘤形态学信息,CE-T₁WI 加权图像反映肿瘤血供情况,DWI 功能成像所生成的 ADC 图反映肿瘤水分子扩散受限的异质性,能从多方 面提供肿瘤异质性信息,辅助临床诊断与治疗^[15-16]。 本研究与 Helge 等^[17]研究类似,他们在机器学习分类 器中使用常规 T₁ 平扫、FLAIR 及 CE-T₁WI 颅脑 MR 图像的定量特征,在预测脑转移瘤的三分类和五分类 原发肿瘤类型方面提供了较高的判别准确性。因此, 采用多种成像序列可以提供更多的信息。本研究中 CE-T₁WI 序列与 ADC 序列纹理分析模型在鉴别肺腺 癌与非腺癌脑转移瘤的 AUC 分别为 0.81 和 0.87,且 三种序列联合诊断效能最佳,其 AUC 为 0.89。因此, MRI 多序列纹理分析预测模型有可能成为区分不同 病理类型肺癌脑转移的有价值的临床工具。

本研究的局限性包括:第一,单一的机构样本数较 少,易导致选择偏倚,因此所获结果的实用性和准确率 尚需大样本量前瞻性研究证实;第二,由于 ROI 采用 人工手绘,这在一定程度上导致了肿瘤靶区勾画的误 差,且未做 ROI 组间一致性分析;第三,本研究鉴别的 病理类型有限,不包括少见的肺癌病理类型脑转移。

综上所述,基于脑转移瘤的 ADC、CE-T₁WI 及 FLAIR 序列纹理分析预测模型有助于鉴别肺部原发 病灶病理类型(腺癌与非腺癌),且三种序列联合纹理 分析分类预测模型效能最佳,有望成为鉴别肺癌脑转 移瘤病理类型的一种无创方法。

参考文献:

- [1] Cagney DN, Martin AM, Catalano PJ, et al. Incidence and prognosis of patients with brain metastases at diagnosis of systemic malignancy: a population-based study [J]. Neuro Oncol, 2017, 19 (11):1511-1521.
- [2] Rios VE, Parmar C, Liu Y, et al. Somatic mutations drive distinct imaging phenotypes in lung cancer[J].Cancer Res, 2017, 77(14): 3922-3930.
- [3] Soffietti R, Abacioglu U, Baumert B, et al. Diagnosis and treatment of brain metasta-ses from solid tumors:guidelines from the European Association of Neuro-Oncology (EANO)[J]. Neuro Oncol, 2017,19(2):162-174.
- [4] Shahabaz, Somwanshi DK, Yadav AK, et al. Medical images texture analysis: A review[C/OL]//Manipal University Jaipur, Malaviya National Institute of Technology Jaipur & IRISWORLD. 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), 2017: 436-441 (2017-07-01). https:// www.researchgate.net/publication/319376367_Medical_images_

 $texture_analysis_A_review.$

- [5] Davnall F, Yip CS, Ljungqvist G, et al. Assessment of tumor heterogeneity: an emerging imaging tool for clinical practice[J]. Insights Imaging, 2012, 3(6): 573-589.
- [6] Goyal A,Razik A,Kandasamy D,et al.Role of MR texture analysis in histological subtyping and grading of renal cell carcinoma:a preliminary study[J].Abdom Radiol,2019,44(10):3336-3349.
- [7] 尹浩霖,李冬宝,蒋宇,等.高通量纹理分析鉴别脑内单发转移瘤和 高级别胶质瘤[J].中华肿瘤杂志,2018,40(11):841-846.
- [8] 卢宇超,李聪,胡道予,等.基于 CT 图像的纹理分析对体外冲击波 碎石术疗效的预测价值[J].放射学实践,2019,34(7):801-804.
- [9] 季顾惟,王科,吴晓峰,等.基于 CT 检查影像组学早期肝细胞癌切除术后肿瘤复发的预测模型构建及其应用价值[J].中华消化外科杂志,2020,19(2):204-216.
- [10] Huang YQ.Liang CH.He L.et al.Development and validation of a radiomics nomogram for preoperative prediction of lymph node metastasis in colorectal cancer[J].J Clin Oncol, 2016, 34(18): 2157-2164.
- [11] Arvinda HR,Kesavadas C,Sarma PS,et al.Glioma grading:sensitivity,specificity,positive and negative predictive values of diffusion and perfusion imaging[J].J Neurooncol,2009,94(1):87-96.
- [12] 熊飞,王叶,王翅鹏,等.ADC 直方图鉴别脑转移瘤病理性质的价 值[J].中国临床神经外科杂志,2018,23(7):452-454.
- [13] 虞芯仪,耿承军,冯银波,等.基于常规 MRI 图像的纹理分析对脑 膜瘤术前分级的临床价值[J].中华放射学杂志,2018,52(5): 356-362.
- [14] Li Z, Mao Y, Li H, et al. Differentiating brain metastases from different pathological types of lung cancers using texture analysis of T₁ postcontrast MR[J].Magn Reson Med, 2016, 76(5): 1410-1419.
- [15] 马霄虹,朱永健,王爽,等.CE-MRI 纹理分析术前预测原发肝细 胞肝癌微血管侵犯的价值[J].中华放射学杂志,2018,52(5): 327-332.
- [16] 孟闫凯,周纯武,张雨晨,等.对比MRI平扫、CE-图像的影像组学标签对直肠癌生存期的预测价值[J].中华放射学杂志,2018,52 (5):349-355.
- [17] Kniep HC, Madesta F, Schneider T, et al. Radiomics of brain MRI: Utility in prediction of metastatic tumor type[J]. Radiology, 2019, 290(2): 479-487.

(收稿日期:2020-03-21 修回日期:2020-09-17)