

· 骨骼肌肉影像学 ·

基于 STIR-MRI 的影像组学模型评估原发性下肢淋巴水肿的临床分期

刘梦珂, 张怡梦, 张妍, 李兴鹏, 郝琪, 张晓杰, 徐井旭, 黄陈翠, 王仁贵

【摘要】 目的:探讨 MRI 影像组学模型对原发性下肢淋巴水肿(PLEL)临床分期的评估价值。**方法:**回顾性搜集 2018 年 1 月—2019 年 12 月在本医院就诊的 132 例单侧 PLEL 患者的临床和影像资料。依据 2020 年国际淋巴协会(ISL)淋巴水肿临床分期标准,Ⅰ期 45 例,Ⅱ期 51 例,Ⅲ期 36 例。将 STIR 序列原始图像导入深睿多模态科研平台,连续选择 10 层肢体肿胀最严重的横轴面图像,逐层在皮下软组织区域内的水肿区手动勾画 ROI,提取影像组学特征 1743 个。采用相关性分析及 F-Test 算法进行特征的筛选,然后采用 logistic 回归分类器分别建立Ⅰ期与Ⅱ期、Ⅱ期与Ⅲ期的分类模型,并采用 ROC 曲线评价模型的鉴别效能。采用决策曲线分析(DCA)评估模型的临床实用性。**结果:**鉴别Ⅰ期与Ⅱ期,共筛选出 10 个组学特征构建预测模型,其在训练集中的 AUC 为 0.935(95%CI:0.886~0.983),在验证集中的 AUC 为 0.917(95%CI:0.858~0.975)。鉴别Ⅱ期与Ⅲ期,共筛选出 10 个组学特征用于建模,其在训练集中的 AUC 为 0.838(95%CI:0.749~0.927),在验证集中为 0.760(95%CI:0.654~0.866)。DCA 验证了影像组学模型鉴别 PLEL 临床分期的临床实用性。**结论:**基于下肢 MRI 建立的影像组学模型可较准确地评估 PLEL 的严重程度,与 PLEL 的临床分期一致性高。

【关键词】 影像组学;磁共振成像;原发性淋巴水肿;下肢;临床分期

【中图分类号】 R445.42;R658.3;R551.2 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2024)04-0517-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A preliminary study on the value of STIR-MRI-based radiomics to identify the clinical staging of primary lower extremity lymphedema LIU-Mengke, ZHANG-Yimeng, ZHANG-Yan, et al. Department of Radiology, Beijing Shijitan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100038, China

【Abstract】 Objective: To explore the evaluation value of MRI radiomics models for clinical staging of primary lower extremity lymphedema (PLEL). **Methods:** A total of 132 patients with unilateral PLEL were retrospectively collected in our hospital from January 2018 to December 2019, and were classified into stage I, II or III according to the clinical staging criteria formulated by International Society of Lymphology (ISL) for lymphoedema in 2020. The original MR images of STIR sequence were imported into the Deepray multimodal research platform, 10 continuous slices of cross-sectional images on which the most severe limb swelling were found were selected, and on each slice of image the region of interest (ROI) were manually drawn at edema area in subcutaneous soft tissue, and then 1743 radiomics features were extracted. The features were filtered by correlation analysis and F-Test algorithm, and logistic regression classifier was used to build the classification models for stage I and II, and stage II and III, respectively. Decision curve analysis (DCA) was used to assess the clinical utility of the models. **Results:** For differentiating stage I and II, 10 radiomics features were selected out and were included for model construction, and the AUC of the model in training set was 0.935 (95% CI: 0.886~0.983) and the valid cohort AUC was 0.917 (95% CI: 0.858~0.975); for stage II vs III, a total of 10 features were screened for model construction; the training cohort AUC was 0.838 (95% CI:

作者单位: 100038 北京,首都医科大学附属北京世纪坛医院放射科(刘梦珂、张怡梦、张妍、李兴鹏、张晓杰、王仁贵); 100038 北京,北京大学第九临床医学院放射科(郝琪); 100089 北京,北京深睿博联科技有限责任公司(徐井旭、黄陈翠)

作者简介: 刘梦珂(1993—),女,山东泰安人,博士研究生,住院医师,主要从事淋巴回流障碍性疾病的影像学研究工作。

通讯作者: 王仁贵, E-mail: wangrg@bjsjth.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61876216)

0.749~0.927) and the valid cohort AUC was 0.760 (95%CI:0.654~0.866). The DCA confirmed the clinical utility of the imaging-radiomics model to identify the clinical stage of PLEL. **Conclusion:** The radiomics model based on lower limb MRI can accurately evaluate the severity of PLEL and has high consistency with the clinical staging of PLEL.

【Key words】 Radiomics; Magnetic resonance imaging; Primary lymphedema; Lower extremity; Clinical stage

下肢淋巴水肿是由于淋巴回流中断或受损,肢体皮下软组织内淋巴液过度积聚,脂肪肥大及纤维结缔组织增生,导致肢体慢性进行性肿胀的疾病^[1]。国际淋巴协会(International Society of Lymphology, ISL)将其分为原发性及继发性,继发性淋巴水肿常发生在手术、外伤、丝虫病和感染等因素后;原发性下肢淋巴水肿(primary lower extremity lymphedema, PLEL)是一种较为罕见的遗传性疾病,与淋巴管功能异常有关^[2-3]。PLEL 患者常表现为无明显诱因出现的慢性进行性下肢肿胀,严重者可发生象皮肿畸形,给患者带来极大的痛苦。早期诊断并准确评估 PLEL 严重程度对患者及时诊治及预防并发症极为重要^[4]。以往 PLEL 影像学诊断主要依赖于核素淋巴显像,但其无法定量评估淋巴水肿的严重程度^[5-6]。MR 具有高软组织分辨率,能够敏感地显示肢体水肿的形态及分布,可评估 PLEL 的严重程度^[7-9]。但传统的 MRI 影像特征分析大多依赖于视觉观察的形态学和部分功能性特征,无法反映病灶区域的微观异质性信息。因此,我们探讨能否通过影像组学方法获取更多的影像诊断信息来评估 PLEL 的严重程度,本研究中通过构建基于 MRI 的影像组学模型,并评价其在鉴别 PLEL 临床分期中的作用,旨在进一步提高对 PLEL 的影像诊断水平,更好地指导临床实现个体化精准治疗。

材料与方法

1. 研究对象

回顾性搜集 2018 年 1 月—2019 年 12 月就诊于本院淋巴外科的单侧 PLEL 患者的病例资料。纳入标准:①由淋巴核素显像诊断为单侧下肢淋巴水肿;②行下肢 MRI 检查。排除标准:①因手术、丝虫病、创伤和感染等因素导致的继发性下肢淋巴水肿;②临床资料不全,无法准确分期;③MR 图像质量差,无法准确勾画感兴趣区。

参照 2020 年 ISL 临床分期标准将患者分为 I~III 期:病变肢体柔软,按压可轻度凹陷,抬高患肢 24 h 后肿胀完全缓解者为 I 期;肢体明显肿胀,按压出现明显凹陷,皮肤弹性减低,抬高患肢 24 h 后肿胀消退不明显者为 II 期;按压肢体水肿处无明显凹陷,肢体皮肤发生改变(如色素沉着、棘皮病、疣状增生、象皮肿)为

III 期^[2]。最终纳入 132 例单侧 PLEL 患者,包括 ISL-I 期 45 例、ISL-II 期 51 例、ISL-III 期 36 例。

2. MR 检查

使用 Phillips Intera Ingenia 1.5T 磁共振扫描仪。患者取仰卧位、足先进,扫描范围自双足至盆腔,分别在足((第一站)、小腿(第二站)和大腿(第三站)连续进行 3 次扫描。采用短时反转恢复(short time inversion recovery, STIR)序列,扫描参数:TR 8549 ms, TE 165 ms, 层厚 7.0 mm, 层间距 0.4 mm, 视野 400 mm×400 mm, 矩阵 240×200, IR 160 ms, 层数 32。

3. 影像组学分析

使用深睿多模态科研平台(<https://keyan.deepwise.com/>)进行影像组学分析,主要包括图像分割、特征提取和筛选及模型构建等步骤。

将横轴面及冠状面 STIR 序列图像以原始 DICOM 格式上传至后处理工作站。由一位具有 10 年 MR 诊断经验的医师在原始横轴面图像上勾画 ROI。勾画前先在冠状面图像上观察患侧肢体肿胀最严重的水平,然后基于此水平连续选择 10 层横轴面图像上,在每层图像上选取皮下软组织区域的水肿区,即在 STIR 图像上呈高信号的区域,勾画全部水肿区,将 10 个层面的 ROI 融合生成 3D-VOI(图 1~3)。为了评估分割的有效性,由另一位有 20 年 MR 淋巴水肿诊断经验的影像科医师检查了图像分割的情况。如果提出质疑,则由两位医师进行商议,达成一致后重新进行 ROI 的勾画。

最终提取了 VOI 的 1743 个影像组学特征,包括一阶特征 342 个、形态特征 14 个及纹理特征 1387 个,纹理特征包括灰度共生矩阵、灰度级区域矩阵、灰度行程矩阵、灰度相依矩阵特征和邻域灰度差分矩阵的特征。特征筛选时首先剔除方差为 0 的特征;然后根据特征间的皮尔逊相关性分析,当训练集中任意两个特征(自变量)之间的线性相关系数值大于 0.9 时,将优先保留与因变量的线性相关系数值较高的特征,并剔除另外一个特征,以减少特征之间的冗余性;其次,采用 F-Test 算法(基于方差分析的特征筛选)用于特征筛选,找出组间有差异的特征引入逻辑斯特回归(logistic regression, LR)建立影像组学模型。对构建的模型使用五折交叉验证法进行模型训练,即把数据分

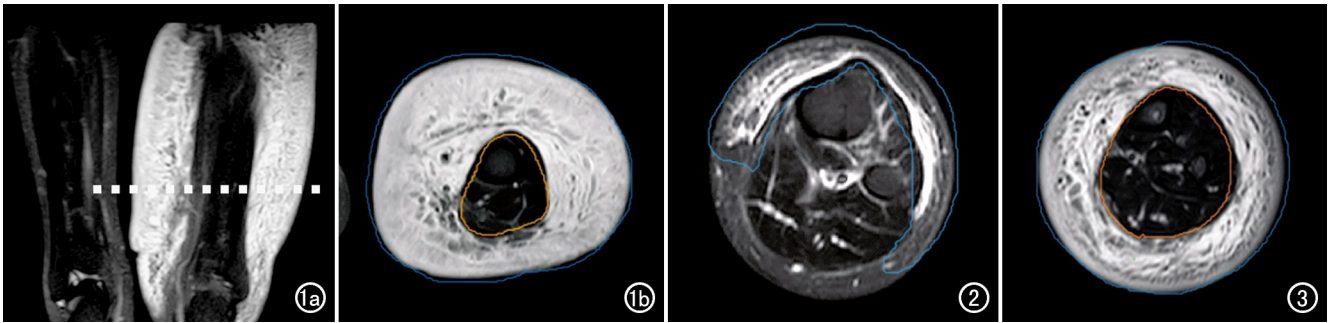


图 1 29 岁男性,原发性下肢淋巴水肿Ⅲ期。a)冠状面 STIR 图像,显示左大腿显著肿胀、增粗,皮下软组织内广泛水肿呈显著高信号,确定患肢肿胀程度最大水平(虚线);b)然后在相应的横轴面图像中选取该水平及相邻的上下共 10 个层面,逐层在皮下软组织水肿区,沿着其边缘勾画 ROI,即图中蓝线与黄线之间的区域。

图 2 23 岁女性,原发性下肢淋巴水肿Ⅰ期,勾画的蓝线内的区域即为 ROI。 图 3 69 岁男性,原发性下肢淋巴水肿 ISL-Ⅱ期,蓝线与黄线之间区域为勾画的 ROI。

成五等份,每次实验拿一份做测试,其余用作训练,实验 5 次求平均值。故训练集与测试集例数相同。

4. 统计学分析

使用 SPSS 23.0 软件进行基本资料的统计分析。符合正态的计量资料以均数±标准差来表示,否则采用中位数±四分位数间距来表示。对于定量资料,若两组数据均呈正态分布,组间比较采用独立样本 *t* 检验,反之则采用 Mann-Whitney *U* 检验;对于分类变量,组间比较采用卡方检验。使用 Scikit 学习软件包建立 ISL-Ⅰ期与 ISL-Ⅱ期及 ISL-Ⅱ期与 ISL-Ⅲ期的分类模型。基于 ROC 曲线分析,采用 AUC、敏感度、特异度和符合率等指标评价模型对 ISL 分期的预测效能。采用决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评估模型的临床价值。以 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

1. 一般临床资料

纳入的 132 例患者中,男 50 例,女 82 例,年龄 2~76 岁,中位年龄 29 岁。各期患者之间临床资料的比较结果见表 1。

ISL-Ⅰ期与 ILS-Ⅱ期比较:两期患者均以女性居多,两组之间性别构成的差异无统计学意义($P>$

0.05);而在年龄和病程方面,两组之间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

ISL-Ⅱ期与 ILS-Ⅲ期比较:Ⅱ期和Ⅲ期患者均以女性居多,两组之间性别构成及年龄的差异均无统计学意义($P>0.05$);Ⅱ期的病程短于Ⅲ期,差异有统计学意义($P<0.05$)。

2. 组学特征筛选及组学模型建立

ISL-Ⅰ期与 ILS-Ⅱ期:训练集 96 例,验证集 96 例。提取的 1743 个特征中,剔除 349 个方差为 0 的特征,然后进行特征间的相关性分析,基于线性相关系数阈值为 0.9,剔除了 1243 个特征后,对剩余的 151 个特征采用 F-Test 算法进行特征筛选,最终共筛选出 10 个特征作为鉴别Ⅰ、Ⅱ期淋巴水肿的特征子集(表 2)。

ISL-Ⅱ期与 ILS-Ⅲ期:训练集 87 例,验证集 87 例。提取的 1743 个特征中,移除 352 个方差为 0 的特征,然后进行特征间的相关性分析,基于 *r* 的阈值 0.9,移除 1211 个特征后,对剩余的 180 个特征采用 F-Test 算法进行特征筛选,共筛选出 10 个特征作为鉴别Ⅱ、Ⅲ期淋巴水肿的特征子集(表 2)。

构建的影像组学模型的 ROC 曲线分析结果见表 3 及图 4~5。影像组学模型在训练集中具有较高的鉴别价值,在验证集中具有良好的预测效能。鉴别 ISL-Ⅰ期与 ILS-Ⅱ期及 ISL-Ⅱ期与 ILS-Ⅲ期的影像组学

表 1 原发性下肢淋巴水肿各分期之间临床资料的比较

指标	ISL-Ⅰ期 vs. ILS-Ⅱ期				ISL-Ⅱ期 vs. ILS-Ⅲ期			
	Ⅰ期	Ⅱ期	统计量	<i>P</i> 值	Ⅰ期	Ⅱ期	统计量	<i>P</i> 值
年龄/岁	21.00±17.00 [*]	37.39±18.59	-3.081 ^b	0.002	37.39±18.59	30.94±16.67	1.661 ^a	0.100
性别/例			0.357 ^c	0.550			0.053 ^c	0.818
男	15(33.3%)	20(39.3%)			20(39.2%)	15(41.7%)		
女	30(66.7%)	31(60.7%)			31(60.8%)	21(58.3%)		
病程/年	2.00±5.50 [*]	9.00±17.00 [*]	-4.476 ^b	<0.001	9.00±17.00 [*]	16.00±22.00 [*]	-2.097 ^b	0.036

注: * 数据采用中位数±四分位数间距表示,其余计量资料的数据采用均数±标准差来表示。^a代表 *t* 值(独立样本 *t* 检验);^b代表 *Z* 值(Mann-Whitney *U* 检验);^c代表 χ^2 值(卡方检验)。

表 2 筛选得到的用于构建Ⅰ期与Ⅱ期及Ⅱ期与Ⅲ期鉴别模型的影像组学特征

Ⅰ vs. Ⅱ			Ⅱ vs. Ⅲ		
特征名称	特征系数	P 值	特征名称	特征系数	P 值
original_shape_SurfaceVolumeRatio	1.0500	<0.001	lbp-3D-k_glszm_SmallAreaEmphasis	0.5784	0.002
squareroot_gldm_SmallDependenceHighGrayLevelEmphasis	0.5837	<0.001	square_glrlm_GrayLevelNonUniformity	0.2245	0.007
lbp-2D_glszm_ZoneEntropy	0.4159	<0.001	wavelet-HH_glcml_Correlation	0.0987	0.018
squareroot_glcml_DifferenceAverage	0.3719	<0.001	square_glcml_DifferenceAverage	0.0841	0.001
lbp-3D-m2_gldm_SmallDependenceHighGrayLevelEmphasis	0.1400	<0.001	gradient_glrlm_ShortRunLowGrayLevelEmphasis	-0.0894	0.002
wavelet-HH_glszm_GrayLevelVariance	0.1377	<0.001	lbp-3D-k_ngtdm_Busyness	-0.2565	0.007
wavelet-HL_glcml_Imc2	0.0694	<0.001	lbp-3D-m2_glcml_ClusterShade	-0.2633	0.014
lbp-3D-m1_glszm_ZoneEntropy	0.0213	<0.001	squareroot_firstorder_TotalEnergy	-0.4145	0.003
lbp-2D_glrlm_ShortRunHighGrayLevelEmphasis	-0.0891	<0.001	original_shape_Maximum2DDiameterRow	-0.4191	0.001
original_glszm_SizeZoneNonUniformity	-0.5251	<0.001	lbp-3D-m2_firstorder_90Percentile	-0.6815	0.001

表 3 原发性下肢淋巴水肿不同临床分期的 ROC 曲线分析

分期预测	AUC(95%CI)	符合率	敏感度	特异度
训练集				
ISL-Ⅰ期 vs. ILS-Ⅱ期	0.935(0.886~0.983)	0.875	0.867	0.882
ISL-Ⅱ期 vs. ILS-Ⅲ期	0.838(0.749~0.927)	0.770	0.784	0.750
验证集				
ISL-Ⅰ期 vs. ILS-Ⅱ期	0.917(0.858~0.975)	0.865	0.867	0.863
ISL-Ⅱ期 vs. ILS-Ⅲ期	0.760(0.654~0.866)	0.701	0.726	0.667

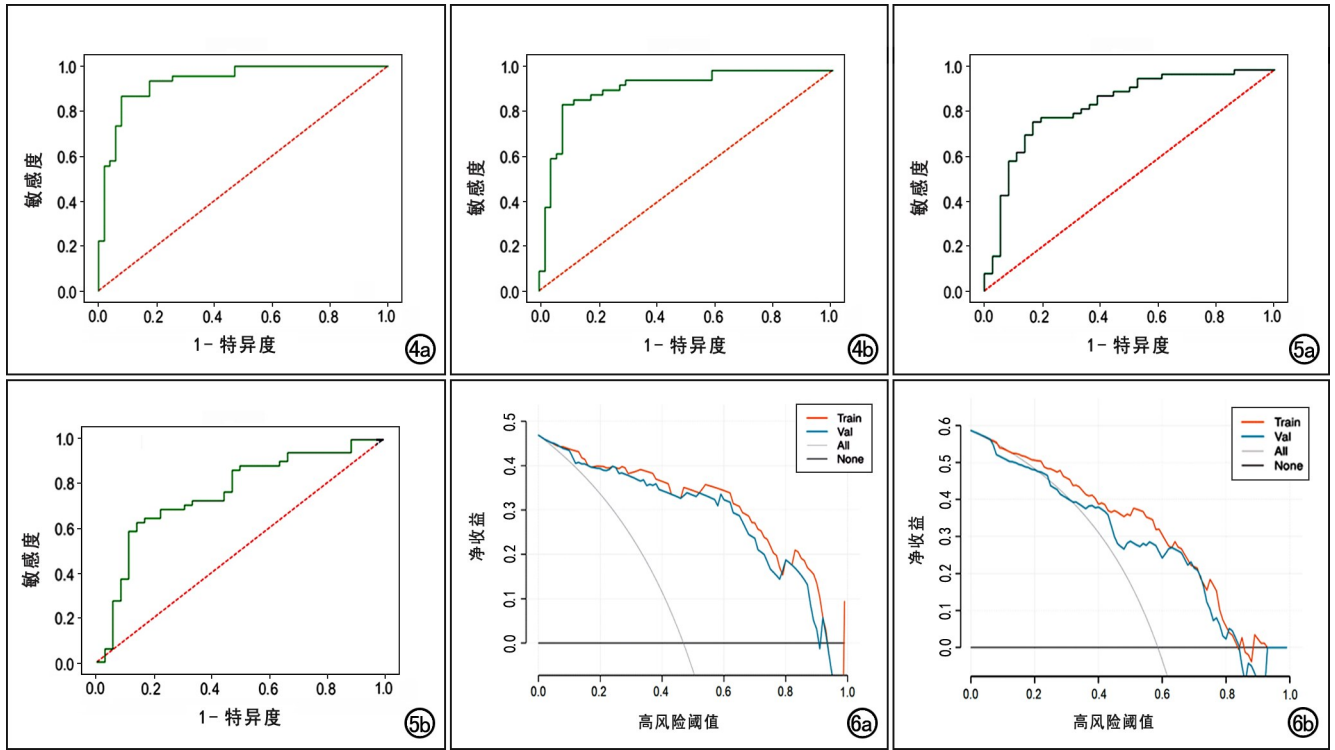


图 4 影像组学模型鉴别原发性下肢淋巴水肿 ISL-Ⅰ期与 ILS-Ⅱ期的 ROC 曲线。a)训练集;b)验证集。
图 5 影像组学模型鉴别原发性下肢淋巴水肿 ISL-Ⅱ期与 ILS-Ⅲ期的 ROC 曲线。a)训练集;b)验证集。
图 6 决策曲线。a)基于影像组学模型鉴别原发性下肢淋巴水肿 ISL-Ⅰ与 ILS-Ⅱ期,灰线表示假设所有患者都是Ⅰ期水肿的决策曲线,黑线表示假设没有患者是Ⅰ期水肿的决策曲线,红线表示训练集,绿线表示验证集,DCA 显示在训练集及验证集中影像组学模型对于Ⅰ期与Ⅱ期 PLEL 的鉴别均具临床优势。b)基于影像组学模型鉴别原发性下肢淋巴水肿Ⅱ、Ⅲ期,灰线表示假设所有患者都是Ⅱ期水肿的决策曲线,黑线表示假设没有患者是Ⅱ期水肿的决策曲线,红线表示训练集,绿线表示验证集,DCA 显示在训练集及验证集中影像组学模型对于鉴别Ⅱ期与Ⅲ期 PLEL 均具临床优势。

模型的决策曲线见图 6, 显示影像组学模型对鉴别 PLEL I 期与 II 期及 II 期与 III 期均能够获得较高的临床收益。

讨 论

PLEL 是慢性进行性淋巴回流障碍性疾病, 疾病初期患者肢体肿胀程度较轻, 随时间发展程度逐渐加重^[10]。目前 ISL 临床分期是目前世界上公认的从临床角度评估下肢淋巴水肿严重程度的可靠方法。I 期水肿时, 随肢体抬高肢体肿胀可消退, 这是由于淋巴管运输的大分子蛋白质在肢体皮下间质中积聚, 无纤维化以及脂肪增生, 此期采用综合减充血疗法(complex decongestive therapy, CDT)能够很好地减轻症状; 当患者进入 II 期, 按压肢体出现明显凹陷, 仅抬高肢体并不能完全减轻组织肿胀, 这是由于长时间的淋巴滞留会引起炎症反应, 促使局部组织纤维化和脂肪组织增生肥大, 此期仅采用 CDT 往往效果不佳, 需要联合手术治疗; 当患者到达 III 期, 皮肤及皮下纤维组织及肥大的脂肪组织进一步增生、沉积, 皮肤明显纤维化而丧失弹性, 肢体在肿胀基础上逐渐出现皮肤变化, 甚至在晚期出现象皮病, 此期患者多采用直接切除手术, 对肢体的损害较大, 患者的预后差^[11]。因此, 下肢淋巴水肿的临床 ISL 分期与治疗密切相关, 准确评估患者分期, 在早期给予准确诊断和及时干预, 对改善患者症状及延缓疾病进展极为重要。

近年来, MRI 由于其无创性、高软组织分辨率以及能够显示整个下肢内液体浸润的能力, 使其成为评估 PLEL 严重程度的最佳影像学方法, 其中 STIR 序列能够消除脂肪组织的高信号, 从而可较敏感和准确地识别水肿的范围及严重程度^[12-14]。Wang 等^[15]通过测量脂肪抑制 MRI 图像上小腿水肿区的面积, 发现其对下肢淋巴水肿的诊断及分期均具有较高的效能。在前期研究中, 我们发现基于 MRI 的厚度等定量指标和影像学表现对 PLEL 的临床分期均具有一定的预测价值^[16-17], 但传统的 MRI 影像分析无法提取病灶区域异质性等微观信息, 而且部分影像征象在疾病晚期才能够观测到, 对于早期 PLEL 的诊断价值有限。

影像组学通过自动或者半自动方法从影像图像中可重复提取肉眼无法识别的海量的微观影像特征, 如异质性、形状、纹理和密度等, 随后进行特征筛选及模型的建立^[18-19]。目前有关淋巴水肿的影像组学研究较少^[20-22]; Son 等^[20]建立了一种基于机器学习自动识别下肢淋巴水肿患者 CT 图像中纤维化的算法; Wu 等^[21]开发和验证一系列基于机器学习算法的模型预测中国女性乳腺癌相关性淋巴水肿的发生风险。基于这些研究, 本研究中尝试基于 STIR 序列构建影像组

学模型, 用于预测 PLEL 的临床分期。在本研究中, 影像组学模型在训练集中具有较高的鉴别价值, 在验证队列中具有良好的预测效能。本研究中用来构建鉴别 PLEL I 期与 II 期放射组学模型的 10 个特征中, 有 1 个是一阶特征, 9 个是纹理特征; 在构建鉴别 PLEL II 期与 III 期的放射组学模型中有 10 个组学特征, 其中有 2 个是一阶特征, 1 个是形态特征, 7 个是纹理特征。其中, 表面积与体积比(Surface Volume Ratio)对鉴别 I 期与 II 期的价值最大; 小区域重点(Small Area Emphasis)及一阶特征中第 90 百分位数(90Percentile)对鉴别 II 期与 III 期的价值最大, 因为他们均具有较高的特征系数。这些细微的纹理差异反映了不同分期的 PLEL 患者水肿区的异质性特征方面存在差异, 而这种差异很难通过对 MRI 图像的肉眼观察来识别。此外, DCA 结果表明影像组学模型对鉴别 PLEL I 期与 II 期及 II 期与 III 期均能够获得较高的临床收益。本研究中构建的 PLEL 不同临床分期的分类诊断模型, 有望成为辅助临床医师进行准确诊断的工具, 可促进对不同程度 PLEL 患者进行个体化精准治疗。

本研究存在一定的局限性: ①ROI 为人工勾画, 可能存在一定的误差; ②没有建立包括病程、性别和年龄等一般临床资料在内的临床模型和综合模型, 在今后的研究中将进一步增加临床资料进行更全面和深入地研究。③本研究是回顾性研究, 病例数有限, 未来会纳入更多的病例进行验证, 以提高该模型的特异性和敏感性。④本研究中选择 10 个病变范围最大的横轴面图像进行分析, 而不是对全下肢的病变区域提取影像组学特征, 因为整个下肢病变的三维分割非常复杂和耗时。⑤本研究中未进行组学特征的测量稳定性的评估。

总之, 基于下肢 STIR-MRI 的影像组学模型能够鉴别 PLEL 的临床分期, 可以作为一种有效的工具辅助影像及临床医师更准确地评估疾病的严重程度, 在早期给予准确诊断和及时干预, 有助于改善患者的症状、延缓疾病进展。

参考文献:

- [1] Maclellan RA, Greene AK. Lymphedema[J]. Semin Pediatr Surg, 2014, 23(4): 191-197.
- [2] Executive Committee of the International Society of Lymphology. The diagnosis and treatment of peripheral lymphedema: 2020 Consensus Document of the International Society of Lymphology [J]. Lymphology, 2020, 53(1): 3-19.
- [3] Kerchner K, Fleischer A, Yosipovitch G. Lower extremity lymphedema update: pathophysiology, diagnosis, and treatment guidelines[J]. J Am Acad Dermatol, 2008, 59(2): 324-331.
- [4] Cucchi F, Rossmeislova L, Simonsen L, et al. A vicious circle in chronic lymphoedema pathophysiology? An adipocentric view[J].

- Obes Rev, 2017, 18(10): 1159-1169.
- [5] Pappalardo M, Cheng MH. Lymphoscintigraphy for the diagnosis of extremity lymphedema: current controversies regarding protocol, interpretation, and clinical application[J]. J Surg Oncol, 2020, 121(1): 37-47.
- [6] 陈林海, 杨专, 郑钧水, 等. 淋巴水肿影像诊断的研究进展[J]. 中华整形外科杂志, 2021, 37(4): 446-451.
- [7] Cellina M, Martinenghi C, Panzeri M, et al. Noncontrast MR lymphography in secondary lower limb lymphedema[J]. JMRI, 2021, 53(2): 458-466.
- [8] Arrive L, Derhy S, Dahan B, et al. Primary lower limb lymphoedema: classification with non-contrast MR lymphography[J]. Eur Radiol, 2018, 28(1): 291-300.
- [9] Soga S, Onishi F, Mikoshi A, et al. Lower limb lymphedema staging based on magnetic resonance lymphangiography[J]. J Vasc Surg Venous Lymphat Disord, 2022, 10(2): 445-453.
- [10] Duhon BH, Phan TT, Taylor SL, et al. Current mechanistic understandings of lymphedema and lipedema: tales of fluid, fat, and fibrosis[J/OL]. Int J Mol Sci, 2022, 23(12): e6621 [2022 Jun 14]. DOI: 10.3390/ijms23126621.
- [11] 信建峰, 孙宇光, 夏松, 等. 淋巴脂肪抽吸减容术在下肢原发性淋巴水肿中的治疗及分析[J]. 中华整形外科杂志, 2019, 35(2): 142-147.
- [12] Kim G, Smith MP, Donohoe KJ, et al. MRI staging of upper extremity secondary lymphedema: correlation with clinical measurements[J]. Eur Radiol, 2020, 30(8): 4686-4694.
- [13] Lu Q, Li Y, Chen TW, et al. Validity of soft-tissue thickness of calf measured using MRI for assessing unilateral lower extremity lymphoedema secondary to cervical and endometrial cancer treatments[J]. Clin Radiol, 2014, 69(12): 1287-1294.
- [14] 李滨, 岳云龙, 金延方. MR 体积指数测量对继发性下肢淋巴水肿分期的价值研究[J]. 实用放射学杂志, 2017, 33(3): 327-330.
- [15] Wang L, Wu X, Wu M, et al. Edema areas of calves measured with magnetic resonance imaging as a novel indicator for early staging of lower extremity lymphedema[J]. Lymphat Res Biol, 2018, 16(3): 240-247.
- [16] 刘梦珂, 李兴鹏, 张妍, 等. 基于 MRI 测量小腿软组织厚度对原发性下肢淋巴水肿分期的研究[J]. CT 理论与应用研究, 2022, 31(4): 479-487.
- [17] 李兴鹏, 李滨, 郝昆, 等. MR 成像对 Klippel-Trenaunay 综合征合并下肢淋巴水肿分期的研究价值[J]. 军事医学, 2023, 47(2): 141-145.
- [18] 吴少虹, 郭莉莉. 影像组学在肺癌中的应用[J]. 放射学实践, 2023, 38(6): 778-782.
- [19] 朱逸峰, 王绍武. 影像组学方法在软组织肿瘤中的应用研究进展[J]. 放射学实践, 2020, 35(11): 1479-1484.
- [20] Son H, Lee S, Kim K, et al. Deep learning-based quantitative estimation of lymphedema-induced fibrosis using three-dimensional computed tomography images[J/OL]. Sci Rep, 2022, 12(1): e15371 [2022 Sep 13]. DOI: 10.1038/s41598-022-19204-6.
- [21] Wu XM, Guan Q, Cheng ASK, et al. Comparison of machine learning models for predicting the risk of breast cancer-related lymphedema in Chinese women[J/OL]. Asia Pac J Oncol Nurs, 2022, 9(12): e100101 [2022 Jun 9]. DOI: 10.1016/j.apjon.2022.100101.
- [22] Nowak S, Henkel A, Theis M, et al. Deep learning for standardized MRI-based quantification of subcutaneous and subfascial tissue volume for patients with lipedema and lymphedema[J]. Eur Radiol, 2023, 33(2): 884-892.

(收稿日期: 2023-07-08 修回日期: 2024-10-24)