医学影像学

DOI：10.13406/j.cnki.cyxb.003567

基于腹部CT平扫图像对急性阑尾炎的诊断：影像组学研究

曲别雪蕾[1]，王可欣[2]，刘　想[1]，张耀峰[3]，张晓东[1]，王霄英[1]
（1.北京大学第一医院医学影像科，北京　100034；2.首都医科大学基础医学院，北京　100069；
3.北京赛迈特锐医学科技有限公司，北京　100011）

【摘　要】目的：探索使用影像组学模型在腹部CT平扫图像上诊断急性阑尾炎的可行性。**方法：**回顾性收集2015年5月至2021年8月北京大学第一医院经手术病理确诊的急性阑尾炎患者的术前腹部CT扫描的影像和临床数据210例，以及同期因其他急腹症行腹部CT平扫的患者210例用于影像组学模型训练。420例患者的CT检查采集于4台不同CT扫描设备。由2位影像科医生手工标注阑尾区域。将数据按7∶3的比例随机分为训练集和测试集。使用特征提取102种图像特征后，使用Pearson相关分析进行特征降维，以递归特征消除法选择最相关的20种特征训练支持向量机（support vector machine，SVM）进行二分类，得到影像组学模型。得到影像组学模型后，对测试集进行预测结果，以受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic，ROC）评价影像组学模型的效能。**结果：**经过特征降维、特征选择后，共有3种形态特征、3种一级特征和14种纹理特征用于训练SVM模型。测试集中SVM模型正确预测114例（阑尾炎60例，非阑尾炎54例），错误预测12例（阑尾炎3例，非阑尾炎9例）敏感度为95.2%，特异度为85.7%，准确率为90.5%，ROC曲线下面积为0.931（95%CI=0.887~0.976）。**结论：**基于腹部CT平扫图像的影像组学模型可用于急性阑尾炎的预测，未来有望用于急腹症CT检查的流程优化。

【关键词】急性阑尾炎；CT；影像组学
【中图分类号】R445　　**【文献标志码】**A　　**【收稿日期】**2023-08-03

Diagnosis of acute appendicitis based on abdominal plain computed tomography scan：a radiomics study

Qubie Xuelei[1]，Wang Kexin[2]，Liu Xiang[1]，Zhang Yaofeng[3]，Zhang Xiaodong[1]，Wang Xiaoying[1]
（1. Department of Medical Radiology，Peking University First Hospital；2. School of Basic Medical Sciences，Capital Medical University；3. Beijing Smart Tree Medical Technology Co.，Ltd.）

【Abstract】*Objective*： To investigate the feasibility of a radiomics model in the diagnosis of acute appendicitis based on abdominal plain computed tomography（CT） scan. ***Methods*：** A retrospective analysis was performed for the preoperative abdominal CT imaging data and clinical data of 210 patients with acute appendicitis confirmed by surgery in our hospital from May 2015 to August 2021，and 210 patients who underwent abdominal plain CT scan due to other acute abdominal diseases during the same period of time were enrolled for the training of the radiomics model. CT scan data of the 420 patients were collected from 4 different CT devices，and the region of the appendix was manually annotated by two radiologists. The data were randomly divided into training set and test set at a ratio of 7∶3. After 102 types of image features were extracted，the Pearson correlation analysis was used for feature dimension reduction，and the recursive feature elimination method was used to select 20 most relevant features for the training and binary classification of support vector machine（SVM） to obtain a radiomics model. After the radiomics model was obtained，the test set was used to predict the results，and the receiver operating characteristic（ROC） curve was used to evaluate the performance of the radiomics model. ***Results*：** After feature dimension reduction and feature selection，3 shape-based features，3 first-order features，and 14 texture features were used to train the SVM model. In the test set，the SVM model had correct prediction in 114 cases（60 appendicitis cases and 54 non-appendicitis cases） and wrong prediction in 12 cases（3 appendicitis cases and 9 non-appendicitis cases），with a sensitivity of 95.2%，a specificity of 85.7%，an accuracy of 90.5%，and an area under the ROC curve of 0.931（95%CI： 0.887-0.976）. ***Conclusion*：** The radiomics model based on abdominal plain CT scan images can be used for the prediction of acute appendicitis and is expected to be used to optimize the workflow of CT examination for acute abdomi-

作者介绍：曲别雪蕾，Email：420876866@qq.com，研究方向：医学影像人工智能研究。
通信作者：王可欣，Email：kexin_wang@mail.ccmu.edu.cn。
优先出版：https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20240819.0908.030（2024-08-19）

nal disease in the future.

【Key words】acute appendicitis；computed tomography；radiomics

阑尾炎是外科急诊手术最常见的原因，全球范围内年发病率为（96.5~100）/10 万成人[1-2]。急性阑尾炎的诊断要求依靠病史、体格检查、实验室检查和影像检查。临床表现典型的急性阑尾炎患者，90% 可依据上述信息做出准确诊断[3]。超声和 CT 是常用的阑尾炎影像检查方法，对非妊娠成人 CT 是首选的影像检查方法[4]。急性阑尾炎的典型 CT 表现为阑尾增粗、壁增厚水肿、阑尾结石、周边脂肪间隙模糊索条影等，诊断困难不大。阑尾炎的 CT 诊断仍存在个别困难情况，如解剖变异导致阑尾不易识别、早期炎症表现轻微导致漏诊等[5]。更重要的是，在急诊行 CT 检查时，要求影像诊断医生不仅快速检出阑尾炎，而且要对全腹其他脏器是否存在急腹症情况也作出迅速、准确性的评估。因此，有必要研究高效、自动的诊断工具以辅助急性阑尾炎的 CT 诊断。

使用影像组学方法可以提取 CT 图像中的高维特征，基于特征工程和统计建模对目标疾病进行分类或回归预测，近年来有不少关于胃肠道肿瘤的影像组学研究[6]，但在急腹症的报告较少。本研究的目的是探索使用影像组学模型在腹部 CT 平扫图像上诊断急性阑尾炎的可行性。

1 资料与方法

1.1 数据入组

回顾性纳入北京大学第一医院手术病例记录系统中 2015 年 5 月至 2021 年 8 月经病理证实的急性阑尾炎患者，纳入标准：有完整的术前检查资料，行急性阑尾炎手术并有完整的病理报告，共获得 424 例数据。按上述病例资料的病案号查询本院影像存储及传输系统及放射管理信息系统中相对应的腹部 CT 数据，排除标准：无本院 CT 图像；本院 CT 图像为术后；扫描范围不完整；图像质量不合格，最终纳入 210 例急性阑尾炎患者的 CT 图像。查找同期因急腹症行腹部 CT 平扫的图像资料，在性别、年龄匹配后入组 210 例非急性阑尾炎患者的 CT 图像。合计 420 例（210 例急性阑尾炎，210 例非急性阑尾炎）纳入研究。本项目为回顾性研究，获得了伦理审查委员会的批准（批件号：2019-170）。

1.2 成像参数

共使用 4 台 CT 设备进行图像采集。扫描范围为全腹，上界达膈面，下界耻骨联合，均为平扫。层厚=1~1.25 mm，层间距=1~1.25 mm，矩阵=512×512。

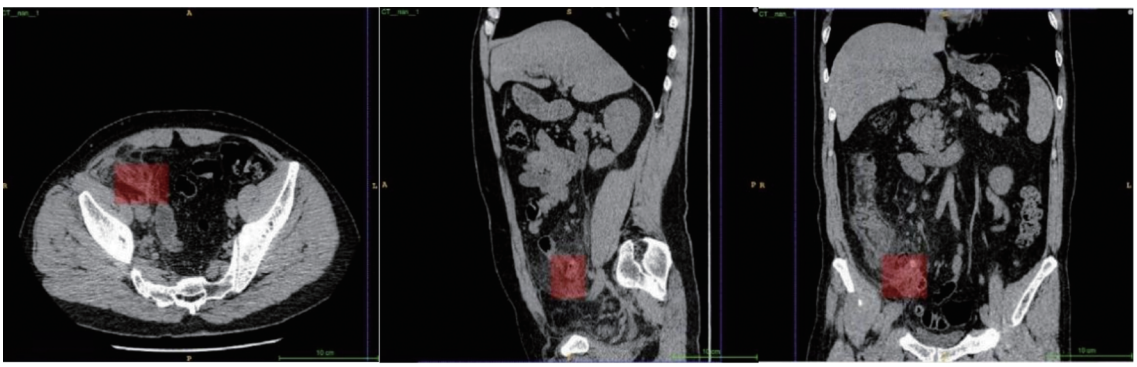
1.3 数据标注和测量

使用 ITK-SNAP 3.8.0 软件（http://www.itksnap.org）标注阑尾感兴趣区（region of interest，ROI）。由 1 位影像医生（影像工作 13 年）标注，由 1 位腹部影像专业医生（影像工作 30 年）检查并修改标注。如果阑尾显示清晰，则标注区域包括阑尾根部至阑尾尖部；如果阑尾显示不佳，则标注盲肠末端区域以及其后内侧（图 1）。

1.4 影像组学模型训练

影像组学模型训练过程包括：特征提取、特征归一化、特征降维、特征选择、分类器训练等过程。

特征提取：使用 PyRadiomics 软件包（https://pyradiomics.readthedocs.io/en/latest/）从 ROI 提取特征。共提取 14 种形态（shape）特征、18 种一级（first order）特征、24 种灰度共生矩阵（gray-level co-occurrence matrix，GLCM）特征、14 种灰度依



A. 轴位　　B. 冠状位　　C. 矢状位

图 1　阑尾区域的 ROI

赖矩阵（gray-level dependence matrix，GLDM）特征、16 种灰度游程矩阵（gray-level run length matrix，GLRLM）特征和 16 灰度大小区域矩阵（gray-level size zone matrix，GLSZM）特征，最终每个 ROI 共提取 102 个图像特征。

特征归一化：使用标准差标准化方法，即对提取出的原始特征数据的均值（mean）和标准差（standard deviation）进行数据的标准化，公式为：$x'=x-\mu\sigma$。其中μ为所有样本数据的均值，σ为所有样本数据的标准差。

特征降维：使用 Pearson 相关性分析（pearson correlation analysis）判断各个特征之间的两两相关性。如果两个特征的 Pearson 相关性系数（pearson correlation coefficient，PCC）>0.10 则认为有相关性，随机删除一个特征，直到所有特征之间的 PCC<0.10。

特征选择：使用递归特征消除（recursive feature elimination，REF）方法筛选最小 20 个特征集合用于最终训练分类器。

分类器训练：按照 7∶3 的比例将数据随机分为训练集（train set）和测试集（test set），训练支持向量机（support vector machine，SVM）模型。SVM 的损失函数为 Hinge loss，公式为：$L_i=\sum_{j\neq y_i}\max(0,S_j-S_{yi}+1)$。

分类器评价：计算分类模型中每个样本的组学得分（rad-score），应用 sigmoidal 函数将组学得分转换为急性阑尾炎的概率 P（P 介于 0～1）。使用受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic，ROC）来评估模型预测的性能。计算 ROC 曲线下面积（area under curve，AUC）。

1.5 统计学方法

使用 R4.2.0 软件进行统计分析。以 Kolmogorov-Smirnov 检验计量数据的正态性。符合正态分布的计量资料用均数 ± 标准差（$\bar{x}\pm s$）表示，不符合正态分布的计量资料用四分位间距[M_d（P_{25}，P_{75}）]表示。计量数据的比较采用 t 检验或 Mann Whitney U 检验。AUC 的置信区间使用 Delong 检验计算。检验水准 α=0.05。

2 结 果

2.1 入组病例特征

420 例患者的病例特征和扫描参数见表 1，患者平均年龄 42（31.0，59.0）岁，女性 48.6%，98.8% 的患者使用 GE LightSpeed VCT 扫描。按 7∶3 随机分为训练集和测试集，2 组间病例特征和扫描参数见表 1。各指标在 2 组间的差异均无统计学意义（P>0.05）。

2.2 影像组学特征

经特征提取、特征归一化、特征降维、特征选择后，共 20 个影像组学特征用于训练分类器。测试集阑尾炎及非阑尾炎组各特征数值见表 2、图 2。

2.3 模型效能

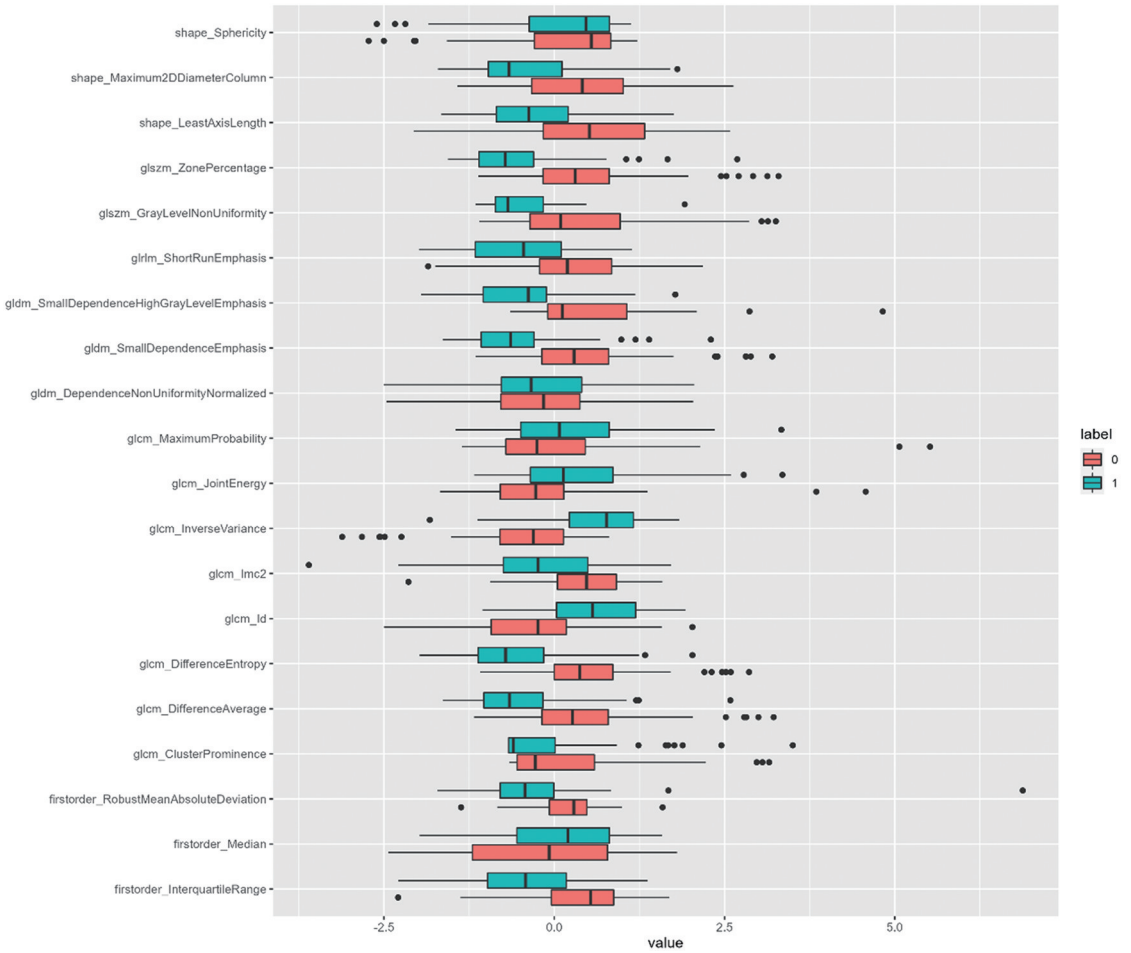
SVM 对测试集的 126 例数据的预测结果见图 3，ROC 分析结果见图 4。测试集中 SVM 模型正确预测 114 例（阑尾炎 60 例，非阑尾炎 54 例），错误预测 12 例（阑尾炎 3 例，非阑尾炎 9 例）敏感度为 95.2%，特异度为 85.7%，准确率为 90.5%，阳性预测值为 0.946，阴性预测值为 0.857，ROC 曲线下面积为 0.931（95%CI=0.887~0.976）。

表 1 阑尾炎和非阑尾炎病例特征和扫描参数[M_d（P_{25}，P_{25}）；n，%]

项目	急性阑尾炎（n=210）	其他急腹症（n=210）	W/χ^2值	P值
年龄	42.0（32.0，56.0）	45.0（30.0，60.8）	20 970.000	0.385
性别			0.000	>0.999
女性	102（48.6）	102（48.6）		
男性	108（51.4）	108（51.4）		
设备厂家			2.005	0.157
GE	208（99.0）	210（100.0）		
Philips	1（0.5）	0（0.0）		
SIEMENS	1（0.5）	0（0.0）		
设备型号			1.817	0.178
Discovery CT750 HD	3（1.4）	0（0.0）		
iCT 256	1（0.0）	0（0.0）		
LightSpeed VCT	205（97.6）	210（100）		
SOMATOM Definition Flash	1（0.5）	0（0.0）		
FOV（mm）	386（360，409）	392（372，415）	19 372.000	0.305
层厚	1.25（1.25，1.25）	1.25（1.25，1.25）	21 840.000	0.158
体素大小	0.75（0.70，0.80）	0.77（0.73，0.81）	19 374.000	0.306

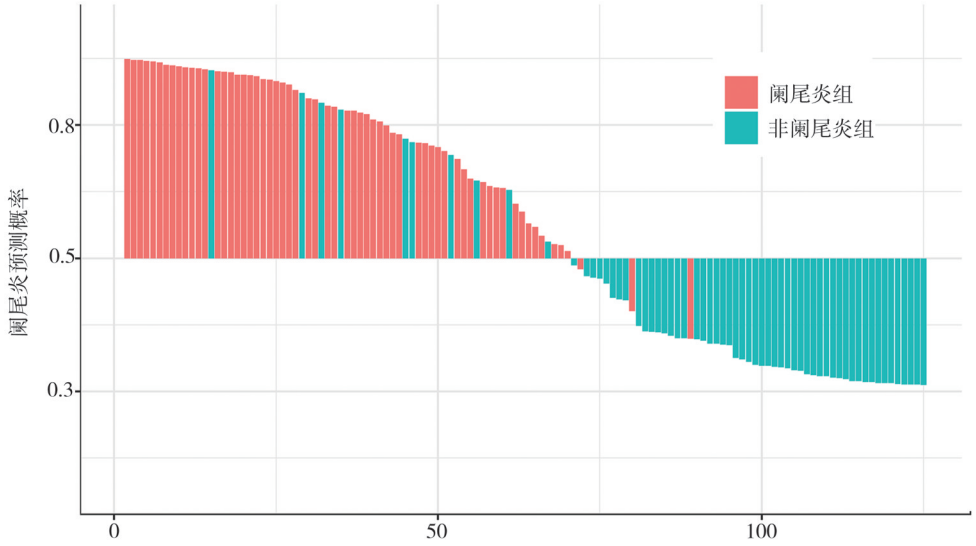
表2 测试集阑尾炎和非阑尾炎组的特征值[M_d(P_{25},P_{25})]

特征种类	特征含义	非阑尾炎组（n=63）	阑尾炎组（n=63）	W值	P值
特征1	一阶特征-四分位间距（firstorder_interquartile range）	0.54（-2.29，1.69）	-0.42（-2.29，1.37）	893	<0.001
特征2	一阶特征-中位数（firstorder_median）	-0.07（-1.20，0.78）	0.20（-0.55，0.81）	2 248	0.199
特征3	一阶特征-鲁棒均值绝对偏差（firstorder_robust mean absolute deviation）	0.29（-1.37，1.59）	-0.43（-1.72，6.88）	885	<0.001
特征4	灰度共生矩阵-聚类突显度（glcm_c luster prominence）	-0.28（-0.66，3.16）	-0.60（-0.68，3.50）	1 246	<0.001
特征5	灰度共生矩阵-差异平均值（glcm_difference average）	0.27（-1.18，3.22）	-0.66（-1.63，2.59）	828	<0.001
特征6	灰度共生矩阵-差异熵（glcm_difference entropy）	0.38（-1.09，2.86）	-0.72（-1.98，2.03）	710	<0.001
特征7	灰度共生矩阵-反差（glcm_Id）	-0.24（-2.50，2.03）	0.56（-1.05，1.93）	3 007	<0.001
特征8	灰度共生矩阵-信息测度（glcm_Imc2）	0.47（-2.14，1.59）	-0.24（-3.60，1.72）	1 259	<0.001
特征9	灰度共生矩阵-反方差（glcm_inverse variance）	-0.31（-3.11，0.806）	0.77（-1.83，1.84）	3 264	<0.001
特征10	灰度共生矩阵-联合能量（glcm_joint energy）	-0.27（-1.68，4.57）	0.13（-1.18，3.35）	2 766	<0.001
特征11	灰度共生矩阵-最大概率（glcm_maximum probability）	-0.25（-0.71，0.46）	0.07（-0.49，0.81）	2 332	0.090
特征12	灰度相关矩阵-相关非均匀性归一化（gldm_dependence nonuniformity normalized）	-0.15（-0.79，0.38）	-0.34（-0.78，0.40）	1 908	0.710
特征13	灰度相关矩阵-小相关强调（gldm_small dependence emphasis）	0.29（-1.15，3.20）	-0.64（-1.64，2.30）	774	<0.001
特征14	灰度相关矩阵-小相关高灰阶强调 gldm_small dependence highgray level emphasis	0.12（-0.649，4.82）	-0.38（-1.96，1.78）	742	<0.001
特征15	灰度游程长度矩阵-短程强调（glrlm_short run emphasis）	0.19（-1.85，2.19）	-0.45（-1.99，1.15）	1 044	<0.001
特征16	灰度大小区域矩阵-灰度非均匀性（glszm_gray level nonuniformity）	0.10（-1.10，3.25）	-0.68（-1.16，1.92）	921	<0.001
特征17	灰度大小区域矩阵-区域百分比 glszm_aonepercentage	0.31（-1.12，3.29）	-0.72（-1.56，2.69）	764	<0.001
特征18	形状特征-最小轴长度（shape_leastaxislength）	0.52（-2.07，2.58）	-0.37（-1.66，1.76）	1 011	<0.001
特征19	形状特征-最大二维径列（shape_maximum2D diameter column）	0.41（-1.42，2.63）	-0.66（-1.71，1.81）	1 072	<0.001
特征20	形状特征-球度（shape_sphericity）	0.54（-0.29，0.83）	0.46（-0.37，0.81）	1 938	0.822



注：选择最佳的20个影像组学特征，图中显示规一化后的特征值；0，非阑尾炎组；1，阑尾炎组

图2 测试集阑尾炎及非阑尾炎组各特征数值



注：纵坐标为预测概率，横坐标每一个数据代表1例患者

图3　SVM对采集数据的预测结果

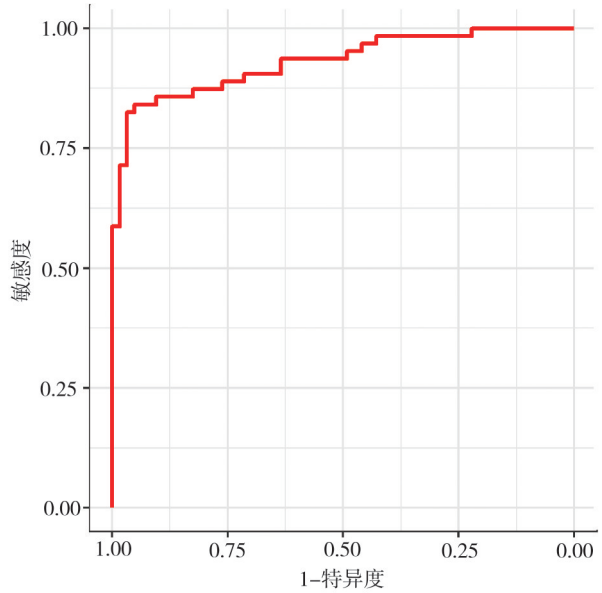


图4　SVM对采集数据的预测ROC曲线

3　讨　论

急腹症表现为突发、严重腹痛，CT是急腹症常用的影像检查手段，其任务是发现可能存在的炎症、感染、缺血、梗阻、穿孔等情况，及时筛选出需要外科干预的患者[7]。全腹CT检查后，影像医师应快速、准确地完成全腹部脏器的诊断。急性阑尾炎是急腹症中最常见的情况，本研究发现使用影像组学方法可以准确地诊断急性阑尾炎，敏感性可达95.2%，未来有可能用于优化急诊CT的诊断流程，提高诊断效率。

国内外关于急性阑尾炎的CT诊断效能研究很多，诊断准确性的报告差异较大[5,8-9]。检索Cochrane数据库[10]，在71项研究中，医生诊断的敏感性估计值为0.72~1.00，特异性估计值为0.5~1.0。尽管报道结果各异，但可以认为总体上医生通过CT图像诊断急性阑尾炎的准确性是较高的。本研究提出的影像组学模型对急性阑尾炎的诊断效能与既往医生诊断结果对比，诊断效能是类似的。

本研究提出影像组学模型不是为了进一步提高诊断准确率，而是期望在保证诊断准确的前提下使用软件辅助医生诊断，以提高医生工作效率。急腹症的疾病谱很广，影像医生诊断时对胃肠道疾病、泌尿系统疾病、妇产科疾病以及血管性疾病等均需要给予关注[7,11]。如果能使用辅助诊断工具对各个脏器病变逐个做出诊断，就有可能优化读片流程，软件在医生读片时给予提醒，由医生最终做出诊断。相信在辅助工具效能较高的情况下，有望缩短读片时间，提高医生工作效率，类似的工作在其他影像诊断任务中已经得到证实[12]。具体到急腹症的辅助诊断，目前已有肾结石自动检出[13]和急性胰腺炎的分类诊断[14]，未来随着急性阑尾炎以及等其他急腹症的辅助诊断软件的研发，将多种辅助诊断工具集成在一起，就可以达到优化整体急腹症诊断流程的目的。对于急性阑尾炎，还有必要进一步对

其分类进行评价，结合CT图像和临床信息进行综合建模，判断其为单纯性阑尾炎与非单纯性阑尾炎，对制定治疗方案提供建议。

本研究使用了常用的影像组学技术进行研究。在特征提取过程中，使用经典的影像特征提取工具PyRadiomics包，使用的特征类型符合本领域的共识，包括形态特征、一级特征和纹理特征[15-16]。在纹理特征中，GLCM类表征的是图像灰度相关性信息，GLRLM类表征的是图像中1D连通域的大小和数目，GLSZM类表征的是图像中2D/3D连通域的大小和数目，GLDM类也表征了图像中2D/3D连通域的大小和数目，但是限制关注邻域的面积[16-17]。由于纹理特征之间存在关联性和相似性，因此使用了Pearson相关分析去除相关性较强的特征，以达到特征降维的目的。SVM是机器学习中常用的监督学习分类器，可适用于小样本数据，对非线性和高维模式识别效果较好[18]。本研究发现在测试集中，CT图像中ROI区域的纹理特征、形状特征和一级特征均可能对鉴别阑尾炎和非阑尾炎有贡献，但其中主要贡献是纹理特征，这跟胰腺炎的相关研究是相似的[14]。

本研究有一定的局限性。①研究队列为回顾性收集，未来应进行前瞻性数据收集和验证，以确定模型实际效能。②本研究中阑尾区域的ROI是手工标注的，将来应基于统计或基于模型自动标注阑尾ROI然后自动预测，以达到优化流程的目标。③本研究未进行读片研究，将来在前瞻性研究时，应观察医生在模型帮助下是否可以提高诊断效率。④未来应收集诊疗过程中的临床综合信息和随访结果，对非典型的急性阑尾炎进行影像组学诊断研究，以提升模型对临床工作的适用性。总之，基于当前的回顾性研究结果，可以认为腹部CT平扫图像的影像组学模型可用于急性阑尾炎的预测，有进一步研究的必要。

参 考 文 献

[1] Ferris M, Quan S, Kaplan BS, et al. The global incidence of appendicitis: a systematic review of population-based studies[J]. Ann Surg, 2017, 266(2): 237-241.

[2] Expert Panel on Gastrointestinal Imaging: Garcia EM, Camacho MA, et al. ACR appropriateness criteria® right lower quadrant pain-suspected appendicitis[J]. J Am Coll Radiol, 2018, 15(11 Suppl): S373-S387.

[3] Coward S, Kareemi H, Clement F, et al. Incidence of appendicitis over time: a comparative analysis of an administrative healthcare database and a pathology-proven appendicitis registry[J]. PLoS One, 2016, 11(11): e0165161.

[4] Paulson EK, Kalady MF, Pappas TN. Clinical practice. suspected appendicitis[J]. N Engl J Med, 2003, 348(3): 236-242.

[5] Fersahoğlu MM, Çiyiltepe H, Ergin A, et al. Effective use of CT by surgeons in acute appendicitis diagnosis[J]. Ulus Travma Acil Cerrahi Derg, 2021, 27(1): 43-49.

[6] Caruso D, Polici M, Zerunian M, et al. Radiomics in oncology, part 1: technical principles and gastrointestinal application in CT and MRI [J]. Cancers, 2021, 13(11): 2522.

[7] Federle MP. CT of the acute(emergency) abdomen[J]. Eur Radiol, 2005, 15 Suppl 4: S100-S104.

[8] 沈俊杰，汤军保. 多层螺旋CT诊断急性阑尾炎临床价值分析[J]. 医学影像学杂志，2022，32(8)：1430-1432.
Shen JJ, Tang JB. Value of multi-slice spiral CT in the diagnosis of acute appendicitis of different pathological types[J]. J Med Imag, 2022, 32(8): 1430-1432.

[9] Eurboonyanun K, Rungwiriyawanich P, Chamadol N, et al. Accuracy of nonenhanced CT vs contrast-enhanced CT for diagnosis of acute appendicitis in adults[J]. Curr Probl Diagn Radiol, 2021, 50(3): 315-320.

[10] Rud B, Vejborg TS, Rappeport ED, et al. Computed tomography for diagnosis of acute appendicitis in adults[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2019, 2019(11): CD009977.

[11] Cartwright SL, Knudson MP. Evaluation of acute abdominal pain in adults[J]. Am Fam Physician, 2008, 77(7): 971-978.

[12] 朱丽娜，高　歌，刘　义，等. CAD整合入前列腺多参数MRI结构化报告：低经验读片者诊断效能研究[J]. 放射学实践，2020，35(10)：1282-1287.
Zhu LN, Gao G, Liu Y, et al. Integrating computer-aided diagnosis with prostate multiparametric MRI structured reports: low-experience radiologists performance study[J]. Radiol Pract, 2020, 35(10): 1282-1287.

[13] Cui YP, Sun ZN, Ma S, et al. Automatic detection and scoring of kidney stones on noncontrast CT images using S. T. O. N. E. nephrolithometry: combined deep learning and thresholding methods[J]. Mol Imaging Biol, 2021, 23(3): 436-445.

[14] Mashayekhi R, Parekh VS, Faghih M, et al. Radiomic features of the pancreas on CT imaging accurately differentiate functional abdominal pain, recurrent acute pancreatitis, and chronic pancreatitis[J]. Eur J Radiol, 2020, 123: 108778.

[15] Zwanenburg A, Vallières M, Abdalah MA, et al. The image biomarker standardization initiative: standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping[J]. Radiology, 2020, 295(2): 328-338.

[16] Hatt M, Le Rest CC, Tixier F, et al. Radiomics: data are also images[J]. J Nucl Med, 2019, 60 Suppl 2: S38-S44.

[17] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics[J]. J Nucl Med, 2020, 61(4): 488-495.

[18] Sidey-Gibbons JAM, Sidey-Gibbons CJ. Machine learning in medicine: a practical introduction[J]. BMC Med Res Methodol, 2019, 19(1): 64.

（责任编辑：周一青）