

基于增强 CT 的直方图参数在重症急性胰腺炎死亡风险评估中的应用价值研究

陶迪¹, 赵自胜¹, 陈俊辉¹, 张小明^{1,2}

(1. 川北医学院附属医院放射科; 2. 医学影像学四川省重点实验室, 四川 南充 637000)

【摘要】目的: 通过非局部均值降噪 (NLM) 技术优化增强计算机断层扫描 (CECT) 图像质量, 构建基于直方图参数的重症急性胰腺炎 (SAP) 患者死亡风险预测模型。**方法:** 回顾性分析 74 例 SAP 患者的临床、实验室及 CECT 数据。对动静脉期图像进行不同噪声系数水平下的 NLM 降噪处理。提取降噪前后胰腺三维容积的直方图参数。通过单因素逻辑回归筛选特征后, 建立二元逻辑回归预测模型, 并与常规 CT 及临床模型比较。**结果:** 74 例 SAP 患者中, 27 例 (36.5%) 死亡。基于 NLM 降噪前后的图像共构建了 8 个直方图模型, 各模型预测效能间无统计学差异 ($P > 0.05$)。直方图模型在死亡风险预测中优于常规 CT 模型及临床模型 ($P = 0.009, P = 0.048$), 而临床模型与常规 CT 模型效能相近 ($P = 0.699$)。**结论:** CECT 直方图参数能有效预测 SAP 患者死亡风险, NLM 降噪后模型性能稳定, 其噪声鲁棒性及量化优势弥补了常规 CT 的局限。

【关键词】 重症急性胰腺炎; 增强计算机断层扫描; 直方图; 非局部均值去噪; 死亡率

【中图分类号】 R445.3

【文献标志码】 A

Application value of contrast-enhanced CT histogram parameters in mortality risk assessment of severe acute pancreatitis

TAO Di¹, ZHAO Zi-sheng¹, CHEN Jun-hui¹, ZHANG Xiao-ming^{1,2}

(1. Department of Radiology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College; 2. Sichuan Province Key Laboratory of Medical Imaging, Nanchong 637000, Sichuan, China)

【Abstract】Objective: To optimize contrast-enhanced computed tomography (CECT) image quality using Non-Local Means (NLM) denoising technology and construct a mortality risk prediction model for severe acute pancreatitis (SAP) patients based on histogram parameters. **Methods:** Retrospective analysis of clinical, laboratory, and CECT data of 74 patients diagnosed with SAP. NLM denoising was applied to arterial and portal venous phase images at different coefficient levels. Three-dimensional volumes of interest were manually delineated in pancreatic parenchyma on original and denoised images, followed by histogram parameter extraction. After univariate Logistic regression feature selection, binary Logistic regression models were built to predict SAP mortality risk and compared with clinical models and conventional CT models. **Results:** A total of 74 patients with SAP, of whom 27 (36.5%) died. After applying NLM-based noise reduction to arterial phase and portal venous phase CECT images, 8 histogram prediction models were constructed under different noise coefficient levels. There was no significant difference in predictive performance among these histogram models ($P > 0.05$). Compared to conventional CT models and clinical models, the histogram models demonstrated higher accuracy in predicting mortality risk ($P = 0.009, P = 0.048$). The predictive performance of the clinical model and the conventional CT model was similar ($P = 0.699$). **Conclusion:** CECT histogram parameters show significant clinical value in predicting mortality risk in SAP patients, maintaining stable performance under different noise coefficient levels after NLM denoising. Their noise robustness and quantitative analysis advantages compensate for the limitations of conventional CT.

【Key words】 Severe acute pancreatitis; Contrast-enhanced computed tomography; Histogram; Non-Local Means denoising; Mortality

急性胰腺炎 (acute pancreatitis, AP) 以胰酶提前激活及释放导致胰腺自我消化为特征, 是最常见的需要立即住院治疗的胃肠道疾病之一^[1]。根据

2012 年修订的亚特兰大分类标准^[2], AP 的严重程度被划分为三级: 轻症、中度重症和重症, 约 20% 的 AP 患者可能进展为重症急性胰腺炎 (severe acute

pancreatitis,SAP),死亡率 30% ~ 40%^[2]。AP,尤其是 SAP,进展迅速,需要临床早期识别干预并开展多学科综合救治。SAP 患者因器官功能衰竭需长期器官支持治疗,显著延长住院周期并导致 ICU 资源高负荷,进而导致系统性医疗资源消耗增加。与此同时,此类患者及其家庭需承担双重经济压力—直接医疗费用(如呼吸机支持、血液净化耗材及免疫调节药物等),间接成本则体现在生产力损失、家庭照护开支及长期康复治疗等隐性负担上,形成对医疗保健系统与患者家庭的复合型经济冲击^[3]。早期识别高死亡风险的 SAP 患者可及时开展器官功能支持治疗,降低患者死亡率,同时优化稀缺医疗资源分配,减少患者家庭与社会经济负担。但目前很少有研究尝试预测 SAP 患者的死亡风险^[1]。

增强计算机断层扫描(contrast-enhanced computed tomography,CECT)在 AP 的诊断、严重程度评估和形态学分类中被广泛应用^[4]。常见的计算机断层扫描(computed tomography,CT)评分系统包括 Balthazar 评分、CT 严重程度指数(CT severity index,CTSI)以及改良 CT 严重程度指数(modified CT severity index,mCTSI)^[5]。然而,仅依靠形态学变化评估病情是不完全准确的。在胰腺或胰周坏死初期或坏死范围较小时,CT 检查可能难以准确识别病灶^[6]。这一局限性推动了多维度图像分析技术的发展。相比全局和多尺度降噪方法,非局部均值去噪(non-local means,NLM)通过计算图像块间的相似性权值矩阵,在保持 CT 图像边缘锐度和纹理特

征方面表现出显著优势,已被广泛用于提高 CT 图像质量^[7-8]。但单纯的空间域增强仍不足以全面量化组织异质性。直方图分析是一种用于定量评估成像数据中体素密度分布的技术,有助于评估感兴趣区域(region of interest,ROI)或感兴趣容积(volume of interest,VOI)内灰度强度的变化,从而为组织学异质性提供线索^[9]。本研究旨在通过 NLM 技术优化 CECT 图像质量,构建基于直方图参数的 SAP 患者死亡风险预测模型。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2014 年 9 月至 2023 年 4 月于川北医学院进行检查的 SAP 患者作为研究对象。该研究已获得医院伦理审查委员会的批准。诊断 AP 必须至少满足以下 3 项标准中的两项:(1)患者出现上腹痛;(2)血清淀粉酶和(或)脂肪酶水平升高超过正常值上限的 3 倍;(3)超声、CT 或 MRI 表现必须提供支持 AP 诊断的证据^[1]。纳入标准:(1)符合 AP 诊断标准且年龄≥18 岁;(2)入院时或住院期间出现持续性器官衰竭(持续时间≥48 h);(3)在住院 1 周内进行过 CECT 扫描。排除标准:(1)患者存在非 SAP 引起的器官衰竭;(2)慢性胰腺炎急性发作;(3)胰腺癌病史;(4)因创伤或中毒引发 AP 并导致其他器官受损;(5)入院前 72 h 内接受过心肺复苏。见图 1。

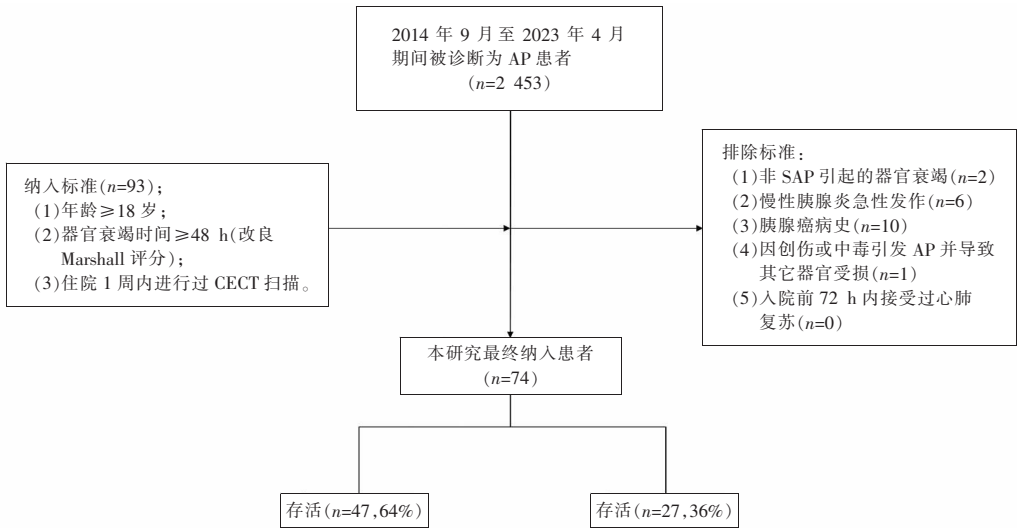


图 1 研究对象流程图

1.2 方法

1.2.1 腹部 CT 扫描方法 在课题组的研究中,腹部 CECT 扫描使用了以下两种 CT 设备中的一种 LightSpeed VCT 128 (GE,Boston,USA),Brilliance 64

(Philips,Netherlands)。标准扫描方案包括三个阶段:平扫期、动脉期和门静脉期。使用电动注射泵以 1.5 mL/kg、3.5 ~ 4 mL/s 的速度向静脉注入造影剂,在注射造影剂 25 s 后行动脉期扫描,注射 60 s

后行门静脉期扫描。CT 扫描参数设置如下:管电压 120 kV;平均管电流 200 mA;矩阵 512 × 512;层厚 5.0 mm;视野 35 × 35 cm²。

1.2.2 常规 CT 特征 两名放射科医生独立对所有腹部 CECT 影像进行回顾性分析。若评价结果差异显著,两名医生商讨后达成一致。他们对患者预后及其他信息(包括临床和实验室数据)均不知情。在广泛查阅相关文献后,阅片医师对以下 CT 特征进行评估^[4,10]:(1)胰腺肿大,可分为局限性或弥漫性肿大;(2)胰腺强化,分为均匀强化或不均匀强化;(3)胰腺坏死范围,分为无坏死、1% ~ 30%、31% ~ 50% 或 > 50%;(4)胰周积聚,包括急性胰周液体积聚(acute peripancreatic fluid collection, APFC)、急性坏死性积聚(acute necrotic collection, ANC)、包裹性坏死(walled-off necrosis, WON)和假性囊肿(pseudocyst, PC);(5)聚集位置,根据积聚累及部位数量按 1-4 级分类,受累部位包括横结肠系膜区、小肠系膜根部、右肾旁前间隙及左肾旁前间隙;(6)是否置入引流管。

1.2.3 CECT 直方图分析 两名放射科医生独立绘制 VOI,涵盖了所有切片上的整个胰腺,绘图时仔细避开大血管,获取每名患者动脉期和门静脉期的 VOI 数据后,对两名医生分别勾画的 VOI 数据进行观察者间一致性分析。使用专用软件(FireVoxel; https://firevoxel.org)进行直方图分析。直方图分析的参数包括:体积、均值、标准差、方差、变异系数、偏度、峰度、熵、1%、5%、10%、25%、50%、75%、90%、95%、99%。在图像预处理阶段,课题组对 74

例患者的动脉期和门静脉期 CECT 图像应用 NLM 算法进行降噪处理,通过调节噪声系数 λ ($\lambda = 0.0/0.3/0.6/0.9$) 实现差异化降噪效果^[11]: $\lambda = 0.0$ 组保留原始图像的细微纹理信息作为基准, $\lambda = 0.3$ 组轻度降噪以保留细小结构, $\lambda = 0.6$ 组平衡噪声抑制与解剖细节保留, $\lambda = 0.9$ 组模拟临床低质量成像场景显著降低噪声水平(图 2)。随后对每组图像的 VOI 进行标准化直方图参数提取,经单因素逻辑回归算法对这些参数降维后,最终采用二元逻辑回归算法构建二分类模型以评估不同噪声系数水平下直方图参数的预测效能。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 26.0 对数据进行统计分析。少数缺失的实验室数据采用期望最大化算法进行多重插补。通过 Shapiro-Wilk 检验判断直方图参数及实验室指标中连续变量的正态性,符合正态分布的计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,组间比较采用独立样本 t 检验;非正态分布的计量资料以 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 描述,组间比较采用 U 检验;计数资料以 $[n(\%)]$ 描述,组间比较采用独立样本 χ^2 检验。观察者间一致性分析采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC),常规 CT 影像学特征则采用 Kappa 分析。在模型构建阶段,对各直方图参数、临床实验室指标及常规 CT 特征进行二分类预测效能分析:采用受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)量化预测能力并通过 DeLong 检验比较模型间差异,为控制多重比较带来的假阳性风险,采用 Bonferroni 校正法调整检验水平。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

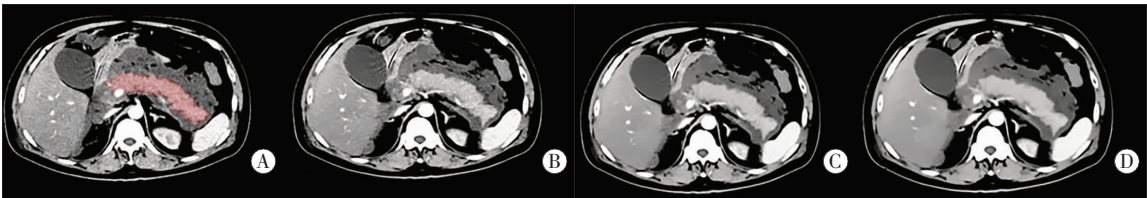


图 2 不同降噪系数水平下的门静脉期 CT 图像

SAP 患者,男,44 岁。在门静脉期 CT 图像中,整个胰腺的感兴趣容积以红色高亮显示(A)。课题组对图像进行了不同噪声系数下的降噪处理:噪声系数分别为 0.3(B)、0.6(C)和 0.9(D)。

2 结果

2.1 临床与实验室特征

本研究共纳入 74 例确诊为 SAP 的患者,其中男性 42 例(57%),女性 32 例(43%)。其中,47 名患者存活,27 名死亡。存活的 SAP 患者血小板水平高于死亡患者($P = 0.038$),死亡患者的尿素水平更高($P = 0.026$)。在存活与死亡患者间,性别、年龄、

病因等其他资料无统计学差异($P > 0.05$)。见表 1。

2.2 常规 CT 影像特征

增强 CT 图像中胰腺坏死程度与患者死亡结局密切相关。胰腺实质坏死范围超过 50% 的患者相较于无胰腺坏死的患者有更高的死亡风险($P = 0.004$)。其他常规 CT 特征,尤其是 CT 图像上胰周受累的类型和范围在存活患者和死亡患者之间无统计学差异($P > 0.05$)。见表 2、图 3 及图 4。

表 1 不同结局患者一般资料比较[$M(P_{25},P_{75}),\bar{x}\pm s,n(\%)$]				
资料	存活($n=47$)	死亡($n=27$)	$\chi^2/t/U$ 值	P 值
性别			0.03	0.87
男	27(57)	15(56)		
女	20(43)	12(44)		
年龄(岁)	55.68 $\pm$ 16.27	60.59 $\pm$ 14.65	-1.30	0.20
病因			3.23	0.35
酒精	3(6.38)	0(0.00)		
高甘油三酯血症	18(38.30)	8(29.63)		
胆石症	21(44.68)	13(48.15)		
特发性	5(10.64)	6(22.22)		
C-反应蛋白水平(mg/L)	162.00 (103.07,236.18)	179.89 (86.29,290.10)	645.00	0.91
中性粒细胞百分比(%)	88.29 $\pm$ 4.48	89.80 $\pm$ 5.03	-1.34	0.19
白细胞($\times 10^9/L$)	14.83 $\pm$ 5.72	16.47 $\pm$ 5.90	-1.18	0.24
血小板($\times 10^9/L$)	185.79(92.27)	146.81(65.61)	482.50	0.04
pH 值	7.30(0.30)	7.22(0.37)	496.50	0.32
红细胞体积分布宽度(%)	13.70 (13.10,14.35)	13.70 (13.35,14.50)	679.00	0.62
抗凝血酶 III(%)	74.00 (63.25,88.15)	69.70 (63.10,88.20)	617.50	0.85
尿素(mmol/L)	8.09(4.34)	13.16(10.75)	782.50	0.03
甘油三酯(mmol/L)	7.79(13.74)	4.71(7.10)	544.50	0.28
总蛋白(g/dL)	62.14 $\pm$ 8.23	59.67 $\pm$ 11.28	1.08	0.28
谷氨酰转肽酶(U/L)	110.37(102.67)	149.63(146.49)	764.50	0.18
直接胆红素(μ mol/L)	13.34(13.21)	22.41(39.02)	667.50	0.25
总胆红素(μ mol/L)	29.86(21.16)	37.21(43.47)	596.50	0.42
葡萄糖(mmol/L)	10.90(8.80,12.64)	11.20(7.53,17.95)	699.00	0.47
Ca ²⁺ (mmol/L)	0.95(0.81,1.09)	0.93(0.83,1.02)	553.50	0.36
降钙素原(ng/mL)	7.50(12.68)	10.80(19.83)	631.50	0.39
胰淀粉酶(U/L)	765.25(645.13)	1 010.41(829.87)	761.50	0.16
脂肪酶(U/L)	1 078.25(974.57)	1 587.47(1761.03)	745.00	0.11

2.3 CECT 直方图分析

在动脉期及门静脉期增强 CT 图像中,存活组 VOI 的平均值均显著高于死亡组($P=0.002$ 和 $P<$

0.001)。在门静脉期图像中,不同噪声系数下具有统计学意义的参数包括均值、标准差、方差、变异系数及 1% ~ 95% 百分位数。值得注意的是,当噪声系数为 0.9 时,动脉期 95% 百分位数与门静脉期相应参数比较无统计学意义。此外,在动脉期和门静脉期图像中,存活组与死亡组在体积、偏度、峰度和熵等形态学参数方面均未表现出统计学差异。

表 2 不同结局患者常规 CT 特征比较[$n(\%)$]				
CT 特征	存活($n=47$)	死亡($n=27$)	χ^2 值	P 值
胰腺增大			0.001	0.970
局限性增大	12 (25.53)	7 (25.93)		
弥漫性增大	35 (74.47)	20 (74.07)		
胰腺强化			2.540	0.111
均匀	19 (40.43)	6 (22.22)		
非均匀	28 (59.57)	21 (77.78)		
胰腺坏死范围			12.926	0.004
无坏死	20 (42.55)	9 (33.33)		
1% ~ 30%	18 (38.30)	6 (22.22)		
31% ~ 50%	6 (12.77)	1 (3.71)		
>50%	3 (6.38)	11 (40.74)		
胰周积聚			1.915	0.653
APFC	34 (72.34)	16 (59.26)		
ANC	9 (19.15)	8 (29.63)		
WON	3 (6.38)	2 (7.41)		
PC	1 (2.13)	1 (3.70)		
积聚累及范围			2.334	0.505
1	3 (6.38)	4 (14.81)		
2	12 (25.53)	4 (14.81)		
3	20 (42.55)	11 (40.74)		
4	12 (25.53)	8 (29.63)		
引流管置入	3 (6.38)	1 (3.70)	0.241	0.624

APFC:胰周液体积聚,ANC:胰周坏死积聚,WON:包裹性坏死,PC:假性囊肿。积聚累及范围:横结肠系膜区、小肠系膜根部、右肾周间隙、左肾周间隙;根据受累部位的总数记录为 1-4。



图 3 坏死范围>50%的 SAP 患者(死亡)

患者,女,72 岁,平扫期(A),动脉期(B),门静脉期(C)。细箭指向胰腺实质区域,粗箭指向坏死区域。坏死区域的密度明显低于胰腺实质,且坏死区域未见强化。



图 4 胰周广泛坏死的 SAP 患者(预后良好)

患者,女,36 岁,平扫期(A),动脉期(B),门静脉期(C)。胰腺实质未见明显坏死,胰周见大量坏死性积聚。

2.4 二元 Logistic 回归分析

课题组首先通过单因素 Logistic 回归分析筛选出与死亡风险相关的直方图参数 ($P < 0.10$)。接着,基于这些参数建立包含全部候选变量的初始模型,并采用向后逐步回归法(进入标准 $P < 0.05$)进行变量精简,最终构建出最优的二元 Logistic 回归预测模型。本研究的直方图分析模型对 SAP 患者死亡风险具有良好预测效能。见表 3。然而,动脉期和门静脉期 CT 图像在不同噪声系数梯度下的直方图模型预测性能间无统计学差异。见图 5。常规 CT 模型对 SAP 患者死亡风险的预测效能 AUC 为 0.635 (95% CI : 0.515 ~ 0.744),敏感度较低(40.7%)。临床模型的 AUC 为 0.671 (95% CI : 0.552 ~ 0.776)。基于 CECT 的直方图模型在动脉期噪声系数为 0.6 时, AUC 最高达 0.869 (95% CI : 0.771 ~ 0.936)。见表 3。直方图模型的预测效能优于常规 CT 模型 ($P = 0.01$) 和临床模型 ($P = 0.05$)。常规 CT 模型与临床模型之间无统计学差异 ($P = 0.70$)。见表 4。两位观察者对常规影像特征的判读一致性良好,勾画的 VOI 在动脉期和门静脉期均表现出良好的一致性。(ICC = 0.879, ICC = 0.869)。

表 3 直方图模型、常规 CT 模型和临床模型的受试者工作特征 (ROC) 曲线分析

参数	AUC 值	95% CI	敏感度 (%)	特异度 (%)
动脉期				
无降噪	0.808	0.700 ~ 0.890	85.2	70.2
噪声系数 = 0.3	0.841	0.737 ~ 0.916	77.8	74.5
噪声系数 = 0.6	0.869	0.771 ~ 0.936	85.2	83.0
噪声系数 = 0.9	0.841	0.737 ~ 0.96	85.2	74.5
门静脉期				
无降噪	0.849	0.758 ~ 0.941	81.5	78.7
噪声系数 = 0.3	0.853	0.761 ~ 0.946	85.2	78.7
噪声系数 = 0.6	0.846	0.751 ~ 0.942	81.5	76.6
噪声系数 = 0.9	0.816	0.709 ~ 0.922	74.1	78.7
传统 CT 模型	0.635	0.515 ~ 0.744	40.7	93.6
临床模型	0.671	0.552 ~ 0.776	37.0	91.5

表 4 直方图模型、常规 CT 模型和临床模型的 ROC 曲线下面积 (AUC) 比较

参数	95% CI	P 值
动脉期		
无降噪 vs. 噪声系数 = 0.3	-0.03 ~ 0.10	0.34
无降噪 vs. 噪声系数 = 0.6	-0.01 ~ 0.13	0.07
无降噪 vs. 噪声系数 = 0.9	-0.04 ~ 0.10	0.36
噪声系数 = 0.3 vs. 噪声系数 = 0.6	-0.03 ~ 0.09	0.37
噪声系数 = 0.3 vs. 噪声系数 = 0.9	-0.07 ~ 0.07	1.00
噪声系数 = 0.6 vs. 噪声系数 = 0.9	-0.03 ~ 0.09	0.33

续表 4

参数	95% CI	P 值
门静脉期		
无降噪 vs. 噪声系数 = 0.3	-0.03 ~ 0.04	0.83
无降噪 vs. 噪声系数 = 0.6	-0.05 ~ 0.06	0.91
无降噪 vs. 噪声系数 = 0.9	-0.04 ~ 0.11	0.35
噪声系数 = 0.3 vs. 噪声系数 = 0.6	-0.04 ~ 0.06	0.78
噪声系数 = 0.3 vs. 噪声系数 = 0.9	-0.03 ~ 0.11	0.27
噪声系数 = 0.6 vs. 噪声系数 = 0.9	-0.01 ~ 0.07	0.17
噪声系数 = 0.3 (动脉期) vs. 常规 CT 模型	0.05 ~ 0.36	0.01
噪声系数 = 0.3 (动脉期) vs. 临床模型	0.00 ~ 0.34	0.05
常规 CT 模型 vs. 临床模型	-0.15 ~ 0.22	0.70

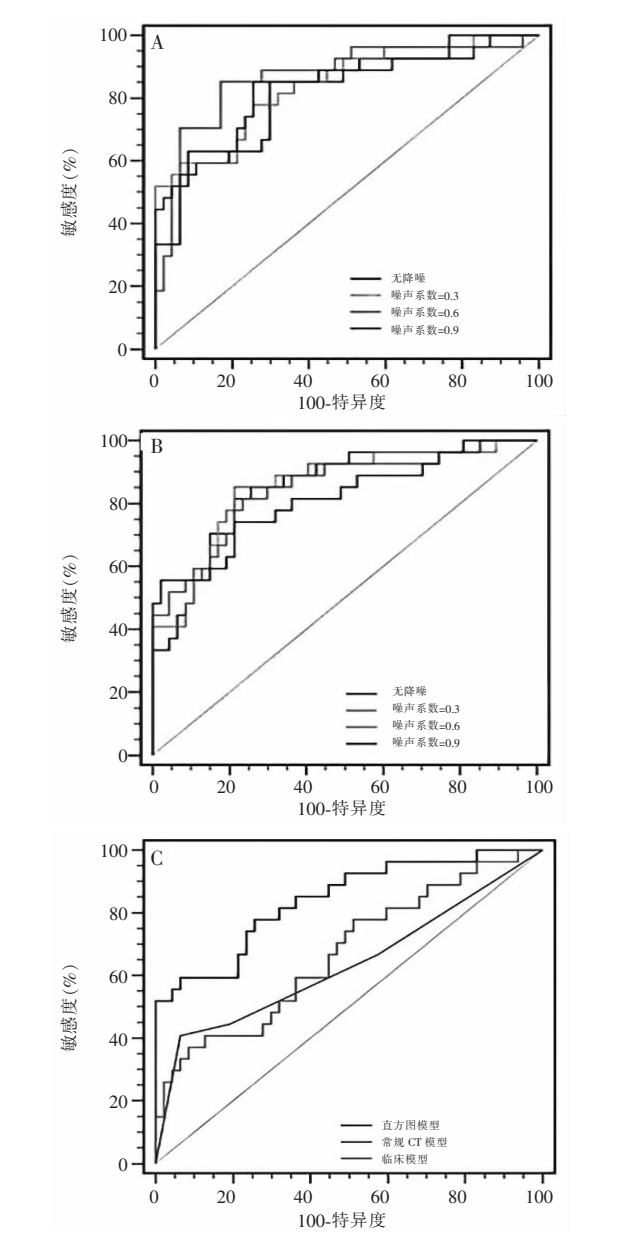


图 5 动脉期和门静脉期不同噪声系数直方图模型、常规 CT 及临床模型的 ROC 曲线

3 讨论

本研究通过对比分析发现,基于 CECT 直方图

特征的预测模型在 SAP 患者死亡风险预测中展现出显著优势,其预测效能优于常规 CT 影像学 and 临床模型评估。值得注意的是,直方图模型在增强 CT 多期相多噪声水平下的预测效能保持稳定,这凸显了其图像质量波动的鲁棒性,提示直方图分析可能成为一种更可靠的影像学工具。

本研究显示 SAP 患者中高甘油三酯血症型的比例高于既往研究^[1],这一现象可能源于亚洲地区高脂血症型胰腺炎发病率近年来呈显著上升趋势。值得注意的是,本研究对酒精性胰腺炎的诊断采用了严格的入选标准(每日酒精摄入量 > 80 g 且持续 ≥ 5 年)^[12],可能导致部分实际饮酒但未达标准的患者被归至其他病因类别。此外,酒精性胰腺炎通常以慢性病程为主,仅有少数进展为重症急性胰腺炎^[12],这一病理特征亦可能解释其在本研究中的低占比现象。

本研究的临床模型对 SAP 患者死亡风险的预测能力为中等,其特异性较高但灵敏度有限,说明模型对高危患者的识别能力不足。值得注意的是,血小板水平下降和尿素水平升高与死亡风险显著相关,与 Garg 等^[13]研究结论一致;然而,pH 值与死亡风险的负相关性在本研究中未得到证实,与 Rumbus 等^[14]的报告存在差异。此外,在常规 CT 表现中,胰腺实质坏死范围是唯一与死亡风险显著相关的影像学指标,这一发现与以往研究结论一致^[14-15],大范围坏死常伴随器官功能障碍及炎症风暴加重,凸显了坏死范围在评估 SAP 患者预后中的核心作用。

传统 CT 评分方法,如 CTSI 和 mCTSI,主要依赖于形态学评估(如胰腺坏死范围、胰周炎症等),但这种方法具有一定主观性,且在 AP 病程早期或坏死范围较小时,其可靠性受到限制^[6]。相比之下,直方图参数能够直接反映胰腺及其周围组织的密度异质性,有助于发现微小病灶,且结果更具客观性。Liu 等^[4]研究表明,平均 CT 密度与器官衰竭及临床干预存在显著相关性。此外,崔等研究了纹理参数在预测儿童 AP 复发中的价值^[16],陈俊飞等^[17]则探讨了间质水肿性胰腺炎与急性坏死性胰腺炎在纹理特征上的差异,但目前课题组尚未发现有研究深入探讨纹理参数与 SAP 患者死亡风险之间的相关性。基于此,本研究通过 CECT 的直方图分析,进一步细化了 CT 密度的描述,并首次探究了纹理参数与 SAP 患者死亡风险的相关性。基于增强 CT 的直方图分析中,灰度值分布的均值和方差可作为评估 SAP 患者死亡风险的重要影像学参数,其作用机制可能与病理生理特征密切相关。均值反映胰腺实质密度变化;方差量化组织均匀性破坏程度。二者均

揭示了 CT 值动态变化与 AP 病程进展及预后的潜在关联。偏度、峰度及熵等非对称性指标在既往研究中被证实与肿瘤异质性及侵袭性密切相关^[18-19],但在 SAP 中这些参数未能显著预测 SAP 患者的死亡风险。这一差异可能源于 SAP 与肿瘤的病理生理机制差异:肿瘤异质性常表现为细胞增殖与凋亡失衡导致的形态学复杂性(如偏度升高),而 SAP 的炎症进程中,组织密度分布的集中趋势(均值)与离散度(方差/标准差)更能反映胰腺实质损伤的严重程度及其转归。此时胰腺密度分布的统计学特征(均值、方差、标准差及 1% ~ 95% 分位数)比局部形态学参数更具临床价值。

从数字图像中去除噪声以揭示潜在信息的过程被称为“降噪”^[20]。高斯滤波器和小波滤波器虽广泛应用于医学图像领域^[21-22],但存在边缘模糊或特征性伪影的局限^[20]。为此,本研究采用 NLM 算法对 CECT 图像进行降噪处理,该算法通过相似像素块的加权平均实现噪声抑制,理论上可平衡平滑效果与细节保留^[23]。课题组系统分析了不同水平噪声系数($\lambda = 0.0/0.3/0.6/0.9$)对降噪后直方图模型预测 SAP 患者死亡风险的影响。在本研究采用的 NLM 降噪方法中,改变噪声系数并未显著提高模型的预测效能。这一结果提示课题组需进一步探讨其潜在原因,具体可能涉及以下几个方面:首先,NLM 算法的自适应特征使其权重计算基于像素块间相似性而非固定邻域,在 SAP 患者的双峰密度分布(坏死区低密度与存活区高密度混合)及炎症浸润导致的边界模糊背景下^[24],算法可能已通过自适应权重分配接近最优降噪状态,进一步调整 λ 仅引起相似权重的微小波动,而对直方图的整体形态(如均值/方差)影响有限^[25];其次,SAP 影像噪声包含随机量子噪声和病理相关噪声(如渗出、出血)等复合成分,这些噪声具有空间异质性并与感兴趣区域灰度分布部分重叠^[23-24],当 λ 偏离真实噪声水平时,NLM 算法无法有效区分病理信号与随机噪声,导致降噪后图像的直方图参数趋于稳定^[20];最后,本研究采用的直方图参数(均值、方差及百分位数)主要反映胰腺实质的整体密度分布特性,对局部噪声波动的敏感性较低,尤其在 NLM 算法全局平滑基础上,调整 λ 不会显著改变坏死区与存活区的灰度对比度^[26],因而对模型预测效能的提升作用有限。

本研究采用三维 VOI 分割以突破传统二维 ROI 分析局部特征的局限,通过捕捉胰腺实质三维密度信息^[15],在动脉期和门静脉期均构建出具有显著预测效能的直方图模型。这是首个将 CECT 直方图参数与 SAP 患者早期死亡风险建立定量关联的研究。

这一研究不仅填补了 SAP 患者早期病情评估中影像学参数应用的空白,更通过双期 CT 数据的稳健性验证,凸显了直方图分析在动态监测炎症进展及预后中的潜在价值。

课题组的研究发现了基于 CECT 的直方图参数在预测 SAP 患者死亡风险方面的重要价值。这不仅有助于临床医师进行早期精准干预,还能通过客观评估工具辅助医患沟通及个体化治疗决策,提升救治效率并降低医疗负担。同时,直方图模型经过 NLM 降噪处理后在双期增强 CT 不同噪声系数水平下展现出的稳健性补充了 SAP 的常规 CT 影像诊断,为 SAP 患者的病情监测开辟了新路径。

参考文献

[1] Trikudanathan G, Yazici C, Evans Phillips A, *et al.* Diagnosis and management of acute pancreatitis[J]. *Gastroenterology*, 2024, 167(4): 673 – 688.

[2] Søreide K, Barreto SG, Pandanaboyana S. Severe acute pancreatitis [J]. *British Journal of Surgery*, 2024, 111(8): znae170.

[3] Barreto SG, Kaambwa B, Venkatesh K, *et al.* Mortality and costs related to severe acute pancreatitis in the intensive care units of Australia and New Zealand (ANZ), 2003-2020 [J]. *Pancreatology*, 2023, 23(4): 341 – 349.

[4] Liu N, He J, Hu X, *et al.* Acute necrotising pancreatitis: measurements of necrosis volume and mean CT attenuation help early prediction of organ failure and need for intervention[J]. *European Radiology*, 2021, 31(10): 7705 – 7714.

[5] Dar G, Nahum Goldberg S, Hiller N, *et al.* CT severity indices derived from low monoenergetic images at dual-energy CT may improve prediction of outcome in acute pancreatitis [J]. *European Radiology*, 2021, 31(7): 4710 – 4719.

[6] Zerem E, Kurtcehajic A, Kunosić S, *et al.* Current trends in acute pancreatitis: diagnostic and therapeutic challenges[J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2023, 29(18): 2747 – 2763.

[7] Lepcha DC, Dogra A, Goyal B, *et al.* A constructive non-local means algorithm for low-dose computed tomography denoising with morphological residual processing[J]. *PLoS One*, 2023, 18(9): e0291911.

[8] Chen Q, Lin K, Zhang B, *et al.* CT morphological features and histogram parameters to predict micropapillary or solid components in stage IA lung adenocarcinoma[J]. *Frontiers in Oncology*, 2024, 14: 1448333.

[9] Fang S, Yang Y, Tao J, *et al.* Intratumoral heterogeneity of fibrosarcoma xenograft models: whole-tumor histogram analysis of DWI and IVIM[J]. *Academic Radiology*, 2023, 30(10): 2299 – 2308.

[10] 肖波, 张小明, 黄小华, 等. 急性胰腺炎: 影像结构化报告的构建[J]. *磁共振成像*, 2020, 11(2): 149 – 154.

[11] 任学智, 何鹏, 龙邹荣, 等. 基于全卷积金字塔残差网络的能谱 CT

图像降噪研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(09): 2950 – 2955.

[12] Hu JX, Zhao CF, Wang SL, *et al.* Acute pancreatitis: a review of diagnosis, severity prediction and prognosis assessment from imaging technology, scoring system and artificial intelligence [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2023, 29(37): 5268 – 5291.

[13] Garg PK, Singh VP. Organ failure due to systemic injury in acute pancreatitis[J]. *Gastroenterology*, 2019, 156(7): 2008 – 2023.

[14] Rumbus Z, Toth E, Poto L, *et al.* Bidirectional relationship between reduced blood pH and acute pancreatitis: a translational study of their noxious combination [J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 1360.

[15] Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data[J]. *Radiology*, 2016, 278(2): 563 – 577.

[16] 崔伟, 张文娟, 周利华, 等. CT 检查纹理分析对儿童急性胰腺炎复发的预测价值[J]. *中华消化外科杂志*, 2021, 20(4): 459 – 465.

[17] 陈俊飞, 王笑笑, 胡景卉, 等. 基于 CT 平扫影像组学模型对早期急性坏死性胰腺炎的鉴别诊断价值[J]. *放射学实践*, 2023, 38(02): 177 – 182

[18] Azoulay A, Cros J, Vullierme MP, *et al.* Morphological imaging and CT histogram analysis to differentiate pancreatic neuroendocrine tumor grade 3 from neuroendocrine carcinoma[J]. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 2020, 101(12): 821 – 830.

[19] Zheng Y, Huang W-J, Han N, *et al.* MRI features and whole-lesion apparent diffusion coefficient histogram analysis of brain metastasis from non-small cell lung cancer for differentiating epidermal growth factor receptor mutation status [J]. *Clinical Radiology*, 2023, 78(3): e243 – e250.

[20] Sadia RT, Chen J, Zhang J. CT image denoising methods for image quality improvement and radiation dose reduction [J]. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2024, 25(2): e14270.

[21] Majeeth SS, Babu CNK. Gaussian noise removal in an image using fast guided filter and its method noise thresholding in medical healthcare application [J]. *Journal of Medical Systems*, 2019, 43(8): 280.

[22] Golilarz NA, Gao H, Kumar R, *et al.* Adaptive wavelet based MRI brain image de-noising [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2020, 14: 728.

[23] Zhang H, Zeng D, Zhang H, *et al.* Applications of nonlocal means algorithm in low-dose X-ray CT image processing and reconstruction: a review[J]. *Medical Physics*, 2017, 44(3): 1168 – 1185.

[24] 王海, 陈凯. 重症急性胰腺炎预后评估综述[J]. *临床医学进展*, 2023, 13(12): 18665 – 18673.

[25] Jia LN, Jiao FY, Liu RQ, *et al.* Local edge direction based non-local means for image denoising [J]. *测试科学与仪器 (英文版)*, 2019, 10(3): 236 – 240.

[26] Sabarish RT, Ramadevi R. Analysis and comparison of image enhancement technique for improving PSNR of lung images by Median filtering over histogram equalization technique [J]. *Cardiome-try*, 2023(25): 818 – 824.

(收稿日期: 2025-02-13 修回日期: 2025-03-12)