DOI:10.19893/j.cnki.ydyxb.2025-0110

基于能谱CT多参数对肺气肿定量诊断价值的研究

张 彤[1],王一涵[2],袁宇宇[3],吴 非[4],黄晓旗[1,5*]

(1. 延安大学附属医院,陕西 延安 716000; 2. 延安大学延安医学院,陕西 延安 716000;
3. 神木市医院,陕西 榆林 719300; 4.白河县人民医院,陕西 安康 725000;
5. 延安市慢性阻塞性肺部疾病数字影像诊疗重点实验室,陕西 延安 716000)

摘 要:目的 探讨能谱CT多参数(全肺碘密度、有效原子序数等)对肺气肿肺灌注异常区域的定量识别与诊断价值。**方法** 回顾性纳入2023年8月至2024年12月行胸部能谱CT检查且符合纳排标准的101例受试者(正常对照组61例,肺气肿组40例)。获取全肺及肺叶层面的平均碘浓度(iodine density, ID)与有效原子序数(effective atomic number, Zeff),并计算低衰减区占比($LAA_{-910\%}$、$LAA_{-950\%}$)。采用独立样本*t*检验或*Mann-Whitney U*检验比较组间差异,使用*Pearson*或*Spearman*相关分析能谱CT参数与LAA%的相关性,应用ROC曲线评估各参数的诊断效能。**结果** 肺气肿组全肺平均ID(0.789±0.340 mg/mL)、Zeff(9.645)显著低于正常组(ID 1.285±0.368 mg/mL、Zeff 10.059)(均$P<0.001$)。平均ID与$LAA_{-910\%}$呈显著负相关($r=-0.660\ 3$,$P<0.001$);与$LAA_{-950\%}$亦呈负相关($r=-0.437\ 9$,$P<0.001$)。ROC分析显示,平均ID诊断肺气肿的AUC为0.837 3(95%*CI*: 0.769~0.925),最佳截断值为0.154 mg/mL时的灵敏度97.0%、特异度48.2%,优于$LAA_{-910\%}$(AUC=0.737 8)。**结论** 能谱CT衍生的碘密度可作为量化肺灌注异常的影像学指标,与传统基于衰减阈值的肺气肿定量指标高度相关,并在早期检测灌注异常方面显示较高的敏感性。能谱CT多参数评估可为肺气肿的早期诊断和病情评估提供有价值的影像学依据。

关键词:能谱CT;肺气肿;肺灌注;定量研究;多参数分析
中图分类号:R513.3;R816.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2639(2026)01-0058-07

Research on the value of multi-parameter spectral CT in the quantitative diagnosis of emphysema

ZHANG Tong[1], *WANG Yihan*[2], *YUAN Yuyu*[3], *WU Fei*[4], *HUANG Xiaoqi*[1,5*]

(1.Yan′an University Affiliated Hospital, Yan′an 716000, China;2.Yan′an Medical College of Yan′an University, Yan′an 716000, China;3.Shenmu City Hospital, Shenmu 719300, China;4.Baihe County People′s Hospital, Ankang 725000, China;5.Yan′an Key Laboratory for Digital Imaging Diagnosis and Treatment of Chronic Obstructive Pulmonary Disease, Yan′an 716000, China)

Abstract: Objective To investigate the value of spectral CT-derived parameters, such as whole-lung iodine density (ID) and effective atomic number (Zeff), in the quantitative identification and diagnosis of perfusion abnormalities in pulmonary emphysema. **Methods** A total of 101 subjects who underwent chest spectral CT between August 2023 and December 2024 and met the inclusion/exclusion criteria were retrospectively enrolled (61 in the normal control group and 40 in the emphysema group). The average ID and Zeff were obtained at both the whole-lung and lobar levels, and the percentage of low-attenuation area ($LAA_{-910\%}$ and $LAA_{-950\%}$) was calculated. Independent samples *t*-test or *Mann-Whitney U* test was used to compare intergroup differences. *Pearson* or *Spearman* correlation analysis was employed to assess the correlation between spectral CT parameters and LAA%.

基金项目:国家自然科学基金(82460345);安康市科学技术研究发展计划项目(AK2023-SF-18)
作者简介:张 彤(2002—),女,陕西西安人,在读硕士研究生。研究方向:胸部影像学。
* **通信作者:**黄晓旗(1988—),男,陕西吴起人,副主任医师。研究方向:呼吸系统疾病与临床研究。
E-mail:344153354@qq.com

The diagnostic performance of each parameter was evaluated using ROC curve analysis. **Results** The whole-lung mean ID (0.789±0.340 mg/mL) and Zeff (9.645) in the emphysema group were significantly lower than those in the normal group (ID: 1.285±0.368 mg/mL; Zeff: 10.059) (all P<0.001). Mean ID showed a significant negative correlation with $LAA_{-910\%}$ (r=−0.660 3, P<0.001) and was also negatively correlated with $LAA_{-950\%}$ (r=−0.437 9, P<0.001). ROC analysis revealed that the AUC of mean ID for diagnosing emphysema was 0.837 3 (95% *CI*: 0.769~0.925). At the optimal cut-off value of 0.154 mg/mL, the sensitivity was 97.0% and specificity was 48.2%, outperforming $LAA_{-910\%}$ (AUC=0.737 8). **Conclusion** Spectral CT-derived iodine density can serve as an imaging biomarker for quantifying pulmonary perfusion abnormalities. It is highly correlated with traditional attenuation-based quantitative indicators of emphysema and demonstrates high sensitivity in early detection of perfusion defects. Multi-parameter assessment using spectral CT provides valuable imaging evidence for early diagnosis and severity evaluation of emphysema.

Key words: Energy spectrum CT; Emphysema; Pulmonary perfusion; Quantitative study of lung perfusion; Multi parameter analysis

慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)是一种以气流受限为特征的慢性肺部疾病。肺气肿是其主要的病理学特征,表现为肺泡含气量过多、过度膨胀和肺实质破坏[1]。研究[2]表明,肺气肿的严重程度与COPD患者的病情进展及生活质量显著相关。因此,准确评估肺气肿对于临床诊断和治疗至关重要。

目前,临床对于肺气肿检测多使用CT扫描,但视觉评估具有误差。而定量计算机断层扫描(quantitative computed tomography, QCT)可实现肺气肿区域占比(LAA%)量化[3],但对肺部灌注与微血管改变评估能力有限[4]。近年来,能谱CT的出现为COPD患者的评估提供了新的视角,其多参数成像优势可同时评估肺气肿的形态与灌注状态,定量分析碘密度,精准反映肺部微循环变化[5]。先前的研究[6]证实,能谱CT衍生的碘密度图可以作为肺灌注的代替指标,识别肺气肿患者中存在的灌注缺陷,并且对于早期肺气肿灌注异常具有高灵敏度[7],为临床早期诊断与治疗提供重要依据。

本研究旨在系统评估能谱CT衍生的多参数(尤其为全肺平均碘密度)在肺气肿诊断中的价值,并探讨其与传统LAA%指标之间的相关性,为肺气肿患者的早期诊断和病情评估提供有价值的影像学依据。

1 方法

1.1 研究人群

本研究为回顾性单中心研究,收集2023年8月至2024年12月期间接受胸部能谱CT平扫及增强扫描肺部正常或仅存在肺气肿患者的临床及能谱CT数据。纳入标准:① 行能谱CT平扫+增强扫描,视觉评估双肺野无明显病变或仅透光度不均匀增强的患者;② 能谱CT扫描图像完整,增强扫描各期图像清晰。排除标准:① 增强扫描期间,因血流动力学因素或扫描时间过晚导致动脉碘浓度过低,而影响数据测量的数据;② 经数据分析软件处理失败的数据;③ 在导出数据过程中,部分数据无法进行数据转换或后续的数据导入;④ 患有肺恶性肿瘤及其他肺内占位性病变、存在胸廓畸形表现及胸部手术史;⑤ 广泛的肺部感染、肺实变、肺不张、大量胸腔积液及严重的肺间质纤维化等影响肺气肿分析的疾病;⑥ 肺栓塞、肺结核等其他呼吸系统疾病患者。最终纳入101例,其中肺气肿组40例,正常组61例。

1.2 能谱CT扫描

在能谱CT(IQon能谱CT, Philips Healthcare, Cleveland, OH, USA)上进行动脉期(AP)胸部扫描。所有患者均取仰卧位扫描,扫描范围从胸腔入口至肋膈角,确保覆盖所有肺组织。

采用的扫描参数如下:管电压:120 kV;转速:0.33 s/rot;螺距:0.671;探测器准直度:64 mm×0.625 mm;图像重建矩阵:512×512。胸部自然扫描后,用功率注射器(Ulrich REF XD 2051)经肘静脉注射65 mL对比剂(碘沙醇,270 mg/mL, GE Healthcare, Ireland),流速为3 mL/s。使用造影剂追踪法进行动脉及静脉期的扫描。患者在检查前接受呼吸训练,以减少扫描过程中的运动伪影。所有图像重建为光谱基础图像(spectral base image, SBI)数据集,光谱重建级别设置为3,重建的切片厚度为1 mm,增量为1 mm。

1.3　CT扫描及定量CT评估

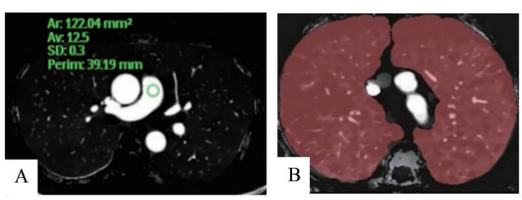
1.3.1　CT扫描　应用128层螺旋CT扫描仪,扫描前对患者进行吸气训练,患者呈仰卧位,双手上举,进行深吸气后屏气全肺扫描。扫描范围自胸廓入口至肋膈角水平,包括全肺组织。采用的扫描参数如下:管电压120 KV,自动管电流(选择剂量等级2,范围30~40 mAs),准直器宽度128×0.625 mm,螺距1.087 5,转速0.5 s/圈,扫描层厚5 mm,视野350~450 mm,矩阵512×512,图像重建1 mm薄层。

1.3.2　定量CT评估　将双气相CT扫描原始数据导入"Dexin-FACT"CT定量分析软件。3D数字肺™分析平台自动进行定量测量,计算出低于特定衰减阈值的面积占双肺面积的百分比,即低密度衰减区百分比(low attenuation area percentage, LAA%),将常规扫描条件下吸气相肺密度值小于-950 HU的区域为肺气肿[8]。

1.4　图像后处理

将符合纳排标准的CT扫描原始数据导入"PHILIPS"系统平台,使用专用软件解决方案[Hold-Segmentation(1.1),Philips IntelliSpace Release 12],经COPD软件自动导出和手动验证进行全肺的划分,在划分过程中自动排除了纵隔结构和中央肺血管。所有结果首先由2名具备3年临床诊断经验的放射科医师分别交叉审核,待两者均确认分割质量合格后,再由1名具备10年以上诊断经验的高年资放射科医师进行复核,对分割结果满意,因此没有对分割结果进行手动调整以避免观察者之间和观察者内部的差异,满足标准的全肺划分数据经过筛选后,以"RT"文件格式导出并导入专用软件进行后续处理。将全肺划分数据结果及CT图像原始数据导入体积定量专用软件(ISD,IntelliSpace Discovery)得到定量数据。

能谱CT多参数数据包括:全肺及各肺叶的平均碘浓度(average iodine concentration, ID)以及有效原子序数(effective atomic number, Zeff)。手动绘制至少占最大直径处血管/心房面积50%的感兴趣区域,以分别评估平均肺动脉(mean pulmonary artery,MPA)和左心房(left atrium,LA)中的平均碘浓度(iodine density,ID)。测量MPA并使用相关公式计算灌注缺损的阈值(低于MPA5%的区域为灌注缺损区域),在ISD软件图像处理界面的阈值设定中输入下限(lower threshold):0及上限(upper threshold):MPA5%计算出来的具体数值,选择全肺并点击运行即可实现定量(图1)。



A:碘浓度图中测量MPA的图像;B:肺气肿患者全肺碘定量,红色部分为定量测量的范围。

图1　能谱CT胸部成像图像后处理结果图示

1.5　统计学方法

采用SPSS26.0统计学分析软件。用*Shapiro-Wilk*检验对计量资料进行正态性检验,正态分布采用($\bar{x}\pm s$)表示,非正态分布采用中位数(四分位数间距)表示。分类变量采用百分比表示。正常组和肺气肿组间差异计量资料采用独立样本t检验或*Mann-Whitney U*检验,计数资料采用χ^2检验比较。采用*Pearson*或*Spearman*相关系数分析能谱CT参数与肺气肿定量指标之间的相关性。P<0.05为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　患者基本情况

共纳入患者101例,其中正常组61例,肺气肿患者40例。两组间BMI和年龄有显著差异性(P<0.001);性别分布亦不同(男性在肺气肿组占比明显较高);吸烟史在两组之间无显著差异(P>0.05,表1)。

表1　患者的临床指标和人口学特征

因素	正常组(n=61)	肺气肿组(n=40)	$Z/t/\chi^2$	P
年龄(岁)	53(46~58)	64(59~68)	-5.945	<0.001
BMI(kg/m²)	23.787±2.85	20.939±2.77	4.537	<0.001
性别,男性[n(%)]	24(39.3)	38(95.0)	5.238	0.022
吸烟[n(%)]	12(19.7)	31(77.5)	2.228	0.136

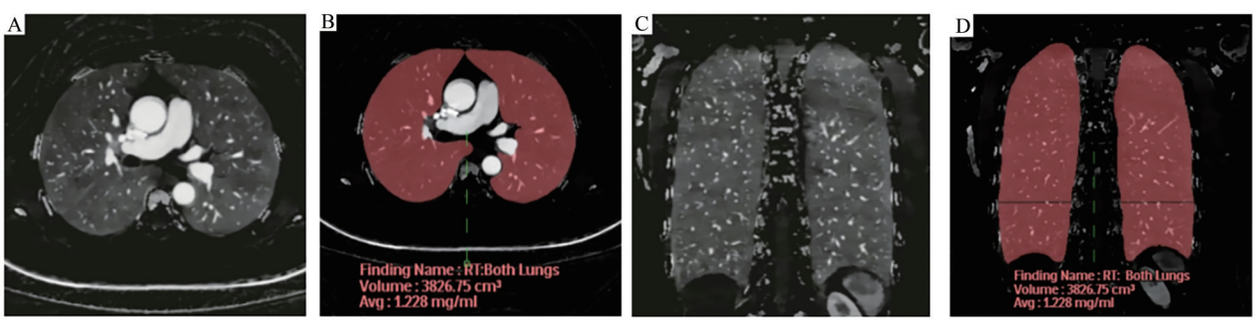
注:数据以n表示,平均值±标准差或中位数(四分位数范围),BMI:身体质量指数。

2.2 两组间能谱CT多参数比较

肺气肿组的平均碘密度和有效原子序数图(Zeff)显著低于正常组(ID:1.285±0.368 *vs* 0.789±0.340 mg/mL,*P*<0.001;Zeff *P*<0.001)。此外,肺气肿组的低$LAA_{-910\%}$和$LAA_{-950\%}$均显著高于正常组(*P*<0.001,表2、图2、3)。

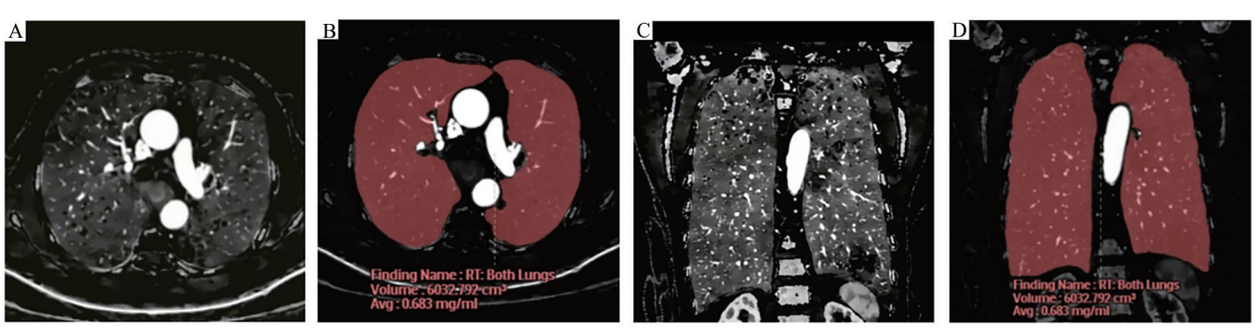
表2 受试者全肺能谱CT多参数组间比较

指标	正常组(*n*=61)	肺气肿组(*n*=40)	*Z*/*t*	*P*
平均碘密度ID(mg/mL)	1.285±0.368	0.789±0.340	6.686	<0.001
有效原子序数图(Zeff)	10.059(9.804~10.201)	9.645(9.188~9.951)	−4.226	<0.001
$LAA_{-910\%}$	23.460(9.765~31.920)	35.630(23.300~43.048)	−1.865	<0.001
$LAA_{-950\%}$	8.870(3.670~14.200)	11.830(7.235~11.312)	−3.849	=0.062



A、B分别是正常被试者的轴位动脉期碘浓度图、全肺平均碘密度(ID)测量图;C、D分别是正常被试者的冠状位动脉期碘浓度图、全肺平均碘密度(ID)测量图。全肺ID为1.228 mg/mL。

图2 正常被试者(女,51岁)碘密度图及定量测量图



A、B分别是正常被试者的轴位动脉期碘浓度图、全肺平均碘密度(ID)测量图;C、D分别是正常被试者的冠状位动脉期碘浓度图、全肺平均碘密度(ID)测量图。全肺ID为0.683 mg/mL。

图3 肺气肿患者(男,70岁)碘密度图及定量测量图

2.3 定量CT指标与能谱CT参数的相关性分析

相关性分析显示,平均碘密度(ID)与肺气肿的定量评估参数(LAA%)之间具有显著负相关性。平均碘密度与$LAA_{-910\%}$的相关系数为−0.660 3(*P*<0.001),与$LAA_{-950\%}$的相关系数为−0.437 9(*P*<0.001)(图3A、C)。Zeff与$LAA_{-910\%}$的相关系数为−0.456 7(*P*<0.05),但相关性强度较平均碘密度稍弱(图3B、D)。

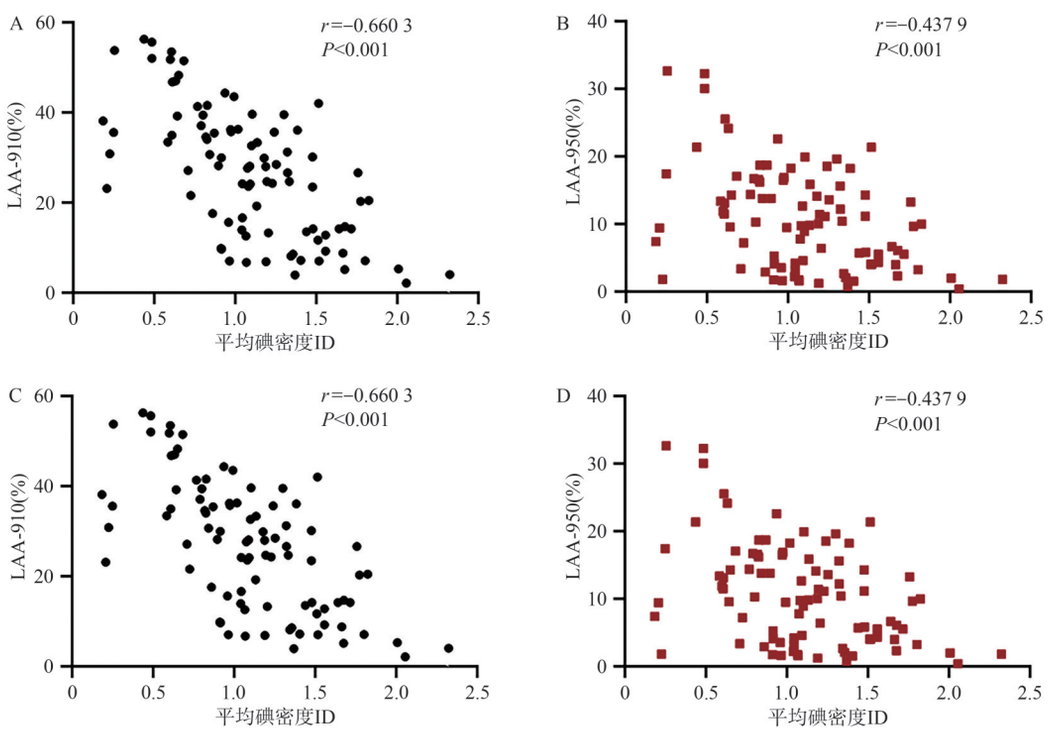
2.4 定量CT指标与能谱CT参数的ROC曲线诊断效能分析

ROC曲线分析表明,平均碘密度(ID)对肺气肿的诊断效能最高,AUC值为0.837 3(95% *CI* 0.769~0.925)。在最佳截断值0.154时,平均碘密度(ID)所对应的灵敏度为97.0%,特异度为48.2%,最大约登指数为0.452。$LAA_{-910\%}$和$LAA_{-950\%}$的AUC值分别为0.737 8和0.615 3,Zeff的AUC值为0.756 3(表3、图4)。

3 讨论

肺气肿的主要病理学改变为肺泡含气量增多、肺泡膨胀和肺实质损害。Lin等[9]研究发现,肺气肿患者常伴有血管内皮细胞损伤和功能障碍。此外,

多项研究[10-11]表明,肺血管的改变不仅出现在症状较轻的COPD患者中,也可见于吸烟但肺功能正常者。肺实质破坏与肺血流灌注障碍均是肺气肿病情进展的重要表现,对COPD患者的预后具有决定性作用。因此,早期发现肺部血流的改变对及时诊断COPD患者非常重要。然而传统CT虽然能提供肺部解剖结构的形态学信息,但无法反映肺实质内的血流灌注情况。近年来能谱CT技术的出现,其能够利用X线在不同能量下的衰减差异,获取能量水平下的X线信息,从而实现对组织特性的多参数分析[12],不仅可以提供全肺的解剖结构信息,还能通过碘密度等参数提供全肺和局部的肺血流灌注信息。此外,能谱CT能够从造影剂增强扫描中生成虚拟平扫(VNC)图像,无需额外的平扫扫描即可进行准确的肺气肿评估,从而减少患者的辐射暴露[13]。



A:平均碘密度ID与$LAA_{-910\%}$的相关性;B:平均碘密度ID与$LAA_{-950\%}$的相关性;C:有效原子序数Zeff与$LAA_{-910\%}$的相关性;D:有效原子序数Zeff与$LAA_{-950\%}$的相关性。

图3　能谱CT参数(ID、Zeff)与LAA(%)的散点图

表3　能谱CT参数对正常组与肺气肿组ROC分析结果

指标	AUC值	95%*CI*	截断值	灵敏度(%)	特异度(%)	最大约登指数
LAA_{-910}(%)	0.737 8	0.648~0.858	6.945	97	10.7	0.077
$LAA-_{950}$(%)	0.615 3	0.503~0.745	1.370	97	3.6	0.006
平均碘密度ID	0.837 3	0.769~0.925	0.154	97	48.2	0.452
有效原子序数Zeff	0.756 3	0.675~0.873	0.133	97	10.7	0.077

本研究结果显示,肺气肿患者的肺泡膨胀和肺实质损害导致肺血管受损,引起肺部灌注异常。肺气肿组全肺平均ID与有效原子序数(Zeff)显著低于正常组($P<0.001$),与前人研究[14]结果一致。进一步的相关性分析发现,肺气肿的平均碘密度与$LAA_{-910\%}$呈显著负相关($r=-0.660\ 3$,$P<0.001$),随着肺气肿程度的加重($LAA_{-910\%}$增加),平均碘密度显著降低。这提示平均碘密度能够有效地反映肺组织密度的变化及肺灌注不足的情况。在病理生理学机制层面,ID降低直接印证了肺气肿患者肺泡-血管耦联损伤理论,即肺泡扩张导致微血管床破坏与血流灌注减少;在临床应用层面,ID在肺功能未显著下降前即可敏感捕捉亚临床期病变,弥补了传统肺功能检查对小气道病变灵敏度不足的缺陷。此外,ROC曲线分析结果显示,ID诊断肺气肿的AUC达0.837 3,显著优于传统CT参数

$LAA_{-910\%}$（AUC=0.737 8），其97%的灵敏度提示对早期灌注异常具有突出检测价值。这一结论与Andersen等[15]的研究结论相似，即与传统CT相比，能谱CT具有更高的敏感性。并且明确了ID的诊断临界值（0.154 mg/mL），其效能量化数据填补了以往研究缺乏AUC比较的空白。

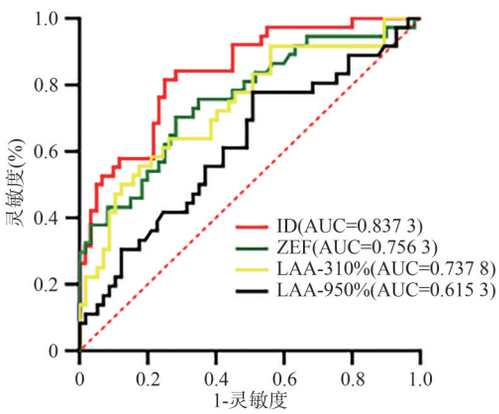


图4　各参数的ROC曲线分析

在本研究中，首次系统证实碘密度（ID）可作为评估肺气肿肺灌注异常的核心影像学生物标志物。能谱CT的平均碘密度参数在肺气肿组显著低于正常组，且与肺气肿的严重程度高度相关。这表明能谱CT能够在肺气肿的早期阶段，即肺功能测试可能尚未出现明显异常时，通过检测肺灌注异常来发现潜在的病变，有利于早期肺气肿的检出。与Elbehairy等[16]发现肺气肿者肺灌注较正常人显著减低（P=0.000 1）相一致，且肺实质的破坏程度与该部位肺灌注减低程度呈正相关，证实能谱CT在评估肺气肿患者肺灌注异常方面的优势。本研究突破单一参数分析局限，同步整合功能参数（ID）、组织成分参数（Zeff）及形态参数（LAA%），建立多维度评估体系，Lee等[17]的研究仅关注肺叶灌注的分布，而本研究首次提出Zeff与$LAA_{-910\%}$的负相关性（r=-0.456 7），揭示肺气肿进程中伴随肺泡壁结构蛋白流失的新证据。Zeff作为组织元素构成的表征参数，其下降提示肺气肿区域气腔比例增加与实质成分减少，这一发现拓展了能谱CT在组织特性分析中的应用边界。其次，在方法学上采用全肺自动分割技术（ISD软件），避免了人工ROI测量的主观偏差，可显著提升结果可重复性。

然而，本研究也存在一定局限性。首先，本研究主要关注于肺气肿患者的肺部灌注情况，对于其他肺部相关的病理生理学机制的研究较少，未来研究可以结合其他影像学技术和生物标志物，对肺气肿的病理生理学特征进行更全面的学习和分析。其次，本研究未对不同严重程度的肺气肿患者进行分组研究。同时，研究也未对不同治疗方案对肺灌注的影响进行评估。最后，样本量相对较少，需要进一步的多中心试验，扩大样本量，纳入不同严重程度和接受不同治疗方案的肺气肿患者，进一步验证能谱CT参数对肺气肿的诊断价值。

综上所述，能谱CT多参数能够对肺气肿患者的肺灌注不足区域进行定量研究，弥补了定量CT在反映肺部血流方面的不足。该方法有助于对临床症状不明显的COPD患者进行早期诊断和及时治疗。能谱CT衍生的平均碘密度为识别肺气肿相关灌注异常的有效影像学指标，其数值与传统LAA%高度相关且在诊断灵敏度方面表现优越。能谱CT多参数评价有望弥补常规CT在反映肺血流灌注方面的不足，为早期发现及定量评估肺气肿提供重要影像学支持。

参考文献：

[1]中华医学会呼吸病学分会慢性阻塞性肺疾病学组，中国医师协会呼吸医师分会慢性阻塞性肺疾病工作委员会. 慢性阻塞性肺疾病诊治指南（2021年修订版）[J]. 中华结核和呼吸杂志，2021，44(3)：170-205.

[2]赵琳，金晨望，曹宪宪，等. 慢性阻塞性肺疾病患者肺气肿严重程度与肺功能指标的相关性[J]. 实用放射学杂志，2022(3)：385-388.

[3]ASLAN E，KAYA F，ÖZGÜL E，et al. Quantitative computed tomography analysis of emphysema severity and distribution in chronic obstructive lung disease，correlation with clinical findings [J]. Tuberkuloz Ve Toraks，2021，69(3)：338-348.

[4]CAJIGAS H R，LAVON B，HARMSEN W，et al. Quantitative CT measures of pulmonary vascular volume distribution in pulmonary hypertension associated with COPD：Association with clinical characteristics and outcomes[J]. Pulmonary Circulation，2023，13(4)：e12321.

[5]FOTI G，LONGO C，FACCIOLI N，et al. Quantitative assessment of lung volumes and enhancement in patients with COVID-19：Role of dual-energy CT[J]. Diagnostics，2023，13(6)：1201.

[6]JEYIN N，DESAI S R，PADLEY S P G，et al. Dual-energy computed tomographic pulmonary angiography accurately estimates lobar perfusion before lung volume reduction for severe emphysema[J]. Journal of Thoracic Imaging，2023，38(2)：104-112.

（下转第68页）