

· 临床研究 ·

探讨不同肺叶定量CT参数在慢性阻塞性肺疾病评估中的价值

吴兴贵¹, 张博², 连一新^{1*}, 高士媛¹, 施敏骅¹, 徐亮², 范国华²¹苏州大学附属第二医院呼吸科, ²影像科, 江苏 苏州 215004

[摘要] 目的: 研究肺叶定量CT参数在慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)病情评估中的意义。方法: 纳入102例行胸部CT及肺功能检查的稳定期COPD患者。肺功能检测指标包括用力肺活量(forced expiratory volume, FVC)及其占预计值百分比(FVC%pred)、第1秒用力呼气容量(forced expiratory volume in one second, FEV1)及其占预计值的百分比(FEV1%pred)、第1秒率(FEV1/FVC)、最大分钟通气量(maximum ventilatory volume, MVV)及其占预计值百分比(MVV%pred)、最大呼气中期流量(maximum mid expiratory flow, MMEF)。测量CT图像中各肺叶低于-950 HU密度区容积百分比(low attenuation area percentage, LAA%)、分段肺叶主气道直径、分段肺叶主气道壁厚度, 并进行统计学分析。结果: 定量CT参数与肺通气功能指标呈线性负相关($P < 0.001$); 左肺下叶LAA%取值13.5%时, 预测MVV%pred < 50%和FEV1%pred < 50%的灵敏度分别为66.2%、75.0%, 特异度为88.4%、81.0%; 左肺下叶气道壁厚度预测FEV1%pred < 50%的截点值为3.35 mm, 其灵敏度和特异度分别为60.5%、72.9%; LAA%联合气道测量值可以解释42%的FEV1%pred, 52%的FEV1/FVC, 31%的MMEF和35%的MVV%pred指标的变化。结论: COPD患者不同肺叶的定量CT参数能反映其肺功能的变化, 并能预测气流受限的严重程度。

[关键词] 慢性阻塞性肺疾病; 肺功能; 定量CT; LAA%**[中图分类号]** R563**[文献标志码]** A**[文章编号]** 1007-4368(2020)03-396-07**doi:** 10.7655/NYDXBNS20200317

Quantitative CT parameters of different lung lobe segmentation in assessment of chronic obstructive pulmonary disease

WU Xinggui¹, ZHANG Bo², LIAN Yixin^{1*}, GAO Shiyuan¹, SHI Minhua¹, XU Liang², FAN Guohua²¹Department of Respiratory, ²Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215004, China

[Abstract] **Objective:** This study aims to investigate the significance of lung lobe quantitative CT parameters in assessment of chronic obstructive pulmonary disease (COPD). **Methods:** Total 102 patients with stable COPD were recruited, and performed with chest CT scan and pulmonary function tests. The indexes of pulmonary function include forced expiratory volume (FVC) and predicted value percentage (FVC%pred), forced expiratory volume in one second (FEV1) and predicted value percentage (FEV1%pred), first second rate (FEV1/FVC), maximum ventilation volume (MVV) and its percentage in the expected value (MVV%pred), maximum mid expiratory flow (MMEF). The percentages of low attenuation area below -950 HU (LAA%) and airway dimensions in each lung lobe segments were measured quantitatively. **Results:** Parameters of pulmonary ventilation function were linear negatively correlated with airway indicators ($P < 0.001$). When LAA% of left lower lobe was 13.5%, the sensitivity in prediction of MVV%pred < 50% and FEV1%pred < 50% was 66.2% and 75.0%, specificity was 88.4% and 81.0%, respectively. Wall thickness of 3.35 mm in left lower lobe had 60.5% sensitivity and 72.9% specificity in the prediction of FEV1 < 50%. LAA% combined with airway variables could account for proportional changes in FEV1%pred of 42%, FEV1/FVC of 52%, MMEF of 31%, and MVV%pred of 35%, respectively. **Conclusion:** Quantitative CT parameters of different lung lobe can reflect deterioration of lung function in patients with COPD, and can be applied to predict the severity of airflow limitation.

[Key words] chronic obstructive pulmonary disease; lung function; quantitative CT; LAA%**[基金项目]** 苏州市医学重点学科(SZXK201506)

[J Nanjing Med Univ, 2020, 40(03): 396-402]

*通信作者(Corresponding author), E-mail: lynelian@163.com

慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)是一种常见的慢性呼吸系统疾病,以持续呼吸道症状和气流受限为主要特征^[1]。COPD的组织学异常是小气道病变、肺实质破坏和肺血管病变等多种因素共同作用的结果,可被分为肺气肿型和慢性支气管炎型^[2-3]。肺功能检查是诊断COPD的主要工具,检测指标是评估气流受限程度的主要依据;但对于配合欠佳、肺功能生理性下降或存在检查禁忌证的患者来说,由于不能良好地完成肺功能检查,测试结果无法准确诊断疾病,也不能用于气流受限程度的精确评估^[4-6]。此外,肺功能检查难以区分气管或肺组织结构破坏情况,也无法反映肺叶局部区域的功能差异和气道形态学异常,相比之下,胸部影像学检查有一定优势^[7-9]。随着图像分辨率的逐渐提高及后处理技术的迅速发展,胸部CT定量分析在COPD中的运用得到广泛关注^[10-11],并且被认为对COPD的诊断有一定辅助作用^[12],其图像定量测量是研究COPD表型和预后的一种有效方法^[13-14]。本研究通过对COPD患者胸部CT中不同空间分布的肺气肿指数和气道参数进行量化分析,探讨其与肺功能指标的相关性以及评估气流受限严重程度中的价值。

1 对象和方法

1.1 对象

收集2018年6月—2019年6月在苏州大学附属第二医院就诊、依据2018年《慢性阻塞性肺疾病诊断、治疗及预防全球策略》确诊为COPD稳定期的患者。纳入标准:①年龄 ≥ 40 周岁;②肺功能检查提示持续气流受限[吸入支气管扩张剂后第1秒用力呼气容量(forced expiratory volume in one second, FEV1)/用力肺活量(forced expiratory volume, FVC) $< 70\%$],同期有胸部CT扫描的患者。排除标准:①肺功能提示限制性或混合型通气功能障碍;②合并其他肺部疾病,如支气管哮喘、肺癌、支气管扩张、肺脓肿、肺结核、肺栓塞、弥漫性肺间质病、胸腔积液、气胸、肺部感染、肺不张等;③既往有肺肿瘤史、肺部手术史;④肺功能及胸部CT检查不配合或配合不佳者;⑤胸部CT图像有伪影,图像质量不佳,影响三维重建及肺叶分段者。本研究经医院伦理委员会批准,所有患者知情同意。

1.2 方法

1.2.1 肺功能测量

采用美国森迪斯肺功能仪(型号:VMAXEN-

CORE-299),测定吸入支气管扩张剂后的肺通气功能参数,包括FVC及其占预计值百分比(FVC%pred)、FEV1及其占预计值百分比(FEV1%pred)、第1秒率(FEV1/FVC)、最大分钟通气量(maximum ventilatory volume, MVV)及其占预计值百分比(MVV%pred)、最大呼气中期流量(maximum mid expiratory flow, MMEF)。每位受试者至少测量3次以上。

1.2.2 CT扫描

采用美国通用电气公司的多层螺旋CT(GE Discovery CT 750 HD)采集图像;扫描前先行空气校准,指导患者进行深吸气末屏气,扫描时患者取仰卧位,双手上举置于头枕部,胸部定位,于深吸气末行螺旋扫描,扫描方向为自肺尖至肺底;管电压120 kV,管电流110~300 mA;螺距为0.992:1,转速为0.5 s/r,采集层厚0.625 mm,采用标准算法对图像进行重建。

1.2.3 定量CT参数

所有图像传输至ADW4.7工作站,采用Thoracic VCAR实质分析模块进行三维重建(图1A),启动自动肺叶分段并进行矫正以获得准确的肺叶视区(图1B),并移除气道树;设置CT阈值低于-950 HU显示为蓝色图像(图1C),并应用到分段的肺叶上,记录左肺、右肺、肺总及肺段低密度衰减区百分比(low attenuation area percentage, LAA%)(图1D),即肺气肿指数。运用气道分析模块对CT图像行气道树重建,并对气道树的各肺叶主支气管进行描述(图1E),定位分段肺叶主支气管中心线垂直的断面,自动测量气道直径、气道壁厚度(图1F、G)。定量CT参数测定由高年资放射科医师指导、呼吸科医师完成,每个指标均需测量3次,计算平均值为最终结果。

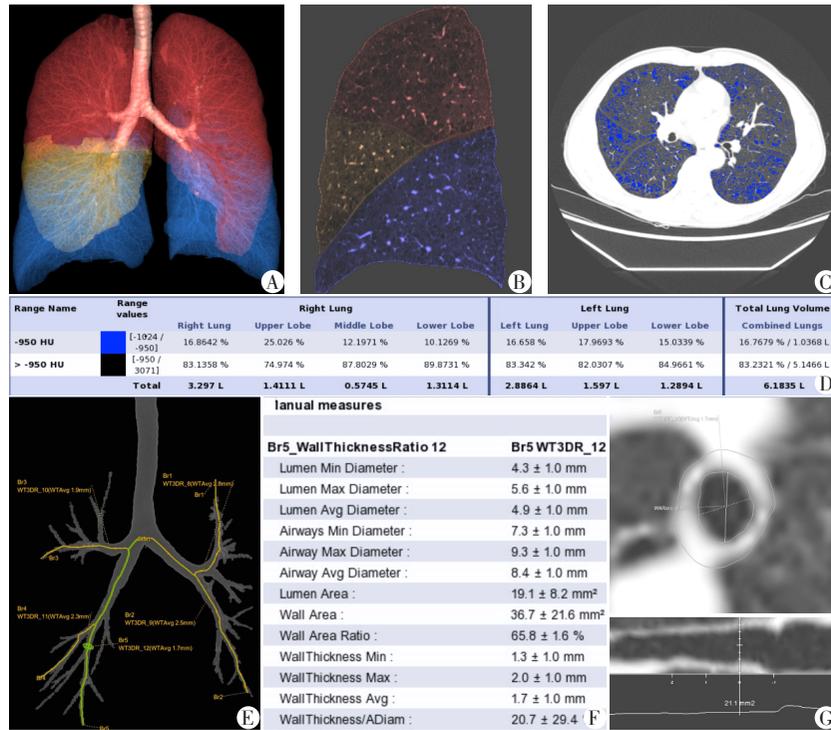
1.3 统计学方法

组间数据比较采用独立样本 t 检验,用Pearson相关性分析来比较定量CT参数与肺功能指标的关系,并用线性回归分析计算线性拟合相关系数;以FEV1%pred $< 50\%$ 、MVV%pred $< 50\%$ 为状态变量,绘制各定量CT参数的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,并计算精确度、截点值、灵敏度、特异度;同时以定量CT参数为解释变量,以肺功能指标为反应变量,进行多元线性回归分析;所有数据统计分析应用SPSS23.0完成, $P \leq 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线资料

按照纳入/排除标准,共102例稳定期COPD患



A:CT扫描图像三维重建MIP肺;B:矢状肺分段肺叶视图;C:轴向肺实质分析,CT阈值<-950 HU 标记为蓝色区;D:统计结果面板显示分段肺叶和定义的HU范围之间组合肺的体积信息;E:气道树三维视图,主气道分支标记;F:右肺下叶分支主气道自动测量参数值;G:气道横截面轮廓自动测量联合手工矫正视图,显示支气管外壁和内壁的轮廓,自动计算气道参数。

图1 肺气肿指数和气道参数量化分析方法

Figure 1 Quantification method of emphysema index and airway dimensions

者入组;依据全球COPD防治倡议(global initiative for chronic obstructive lung disease, GOLD)气流受限程度分级,GOLD 1级15例、GOLD 2级43例、GOLD 3级37例、GOLD 4级7例。将患者分为两组:舒张后FEV1%pred \geq 50%为轻度组(GOLD 1~2级),FEV1%pred<50%为重度组(GOLD 3~4级)。入组患者中,男99例、女3例,年龄50~88岁,体重指数(body mass index, BMI)16.01~30.48 kg/m²,轻度组58例,重度组44例;两组患者年龄、BMI、吸烟情况差异均无统计学意义($P > 0.05$,表1)。

2.2 定量CT参数与肺功能指标的相关性分析

肺叶LAA%与肺功能参数的Pearson相关性分析见表2,除FVC%pred外,其余肺功能指标与各肺叶LAA%均存在负相关,其中FEV1%pred($r = -0.59$, $P < 0.001$)、MMEF($r = -0.53$, $P < 0.001$)和MVV%pred

($r = -0.55$, $P < 0.001$)与左肺下叶LAA%相关性显著;FEV1/FVC($r = -0.67$, $P < 0.001$)与右肺LAA%相关性最强。一元线性回归分析表明FEV1%pred、MMEF、FEV1/FVC、MVV%pred的变化与LAA%具有线性关联($r = 0.28 \sim 0.45$, $P < 0.001$),其中左肺下叶肺气肿对肺功能指标变化影响较大,随LAA%的升高,相应肺功能值越小,气流受限程度越重。定量CT气道参数与肺功能指标的相关性见表3,其中FEV1%pred($r = -0.28$, $P = 0.01$)、FEV1/FVC($r = -0.30$, $P < 0.001$)、MVV%pred($r = -0.28$, $P < 0.001$)与右肺中叶气道壁厚厚度相关性最强;MMEF($r = -0.29$, $P < 0.001$)与右肺中叶气道直径相关性显著。一元线性回归分析显示FEV1%pred($r = 0.08$, $P = 0.005$)、MVV%pred($r = 0.08$, $P = 0.004$)、FEV1/FVC($r = 0.09$, $P = 0.002$)与右肺中叶气管壁厚厚度线性关联,MMEF与右肺中叶气道

表1 两组患者基本特征

Table 1 Baseline characteristics and related indexes of two groups

项目	性别(例)		年龄(年)	BMI(kg/m ²)	吸烟史(包·年)	
	男	女			≥ 30	10~30
轻度组($n = 58$)	56	2	71.48 ± 9.13	22.59 ± 2.74	33	25
重度组($n = 44$)	43	1	70.20 ± 7.71	21.64 ± 2.74	25	19

直径线性关联($r=0.09, P=0.003$),可反映部分肺功能的变化。

2.3 定量CT参数与肺功能指标多元线性回归分析

通过多元线性回归分析,发现COPD患者部分肺叶定量参数与FEV1%pred、FEV1/FVC、MMEF、MVV%pred存在线性负相关,其中左肺下叶、右肺中叶定量参数相关性显著,各变量指标回归系数有统计学意义,变量间不存在多重共线性($VIF < 10$);回归模型检验整体意义的方差分析(ANOVA)结果提

示拟合的线性回归方程具有统计学意义($P < 0.001$)。在多元回归模型中,在LAA%中加入气道相关测量值可以增加调整后 R^2 ,分别可以解释42%的FEV1%pred、52%的FEV1/FVC、31%的MMEF、35%的MVV%pred变化(表4)。

2.4 定量CT参数预测肺功能的价值

图2为预测FEV1%pred < 50%、MVV%pred < 50%时定量CT参数的ROC曲线,其中左肺下叶LAA%曲线下面积最大,并且当LAA% > 13.5%时,

表2 肺叶LAA%与肺功能参数的相关性

Table 2 Correlation between LAA% of lung lobe segmentation and pulmonary function parameters

LAA%	Pearson相关	FVC%pred	FEV1%pred	FEV1/FVC	MMEF	MVV%pred
右肺上叶	r值	-0.09	-0.42	-0.51	-0.38	-0.38
	P值	0.33	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
右肺中叶	r值	-0.14	-0.49	-0.57	-0.48	-0.45
	P值	0.15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
右肺下叶	r值	-0.18	-0.58	-0.66	-0.52	-0.54
	P值	0.06	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
左肺上叶	r值	-0.14	-0.45	-0.53	-0.40	-0.41
	P值	0.14	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
左肺下叶	r值	-0.22	-0.59	-0.66	-0.53	-0.55
	P值	0.26	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
右肺总	r值	-0.14	-0.56	-0.67	-0.51	-0.54
	P值	0.16	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
左肺总	r值	-1.82	-0.55	-0.63	-0.49	-0.51
	P值	0.66	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
肺总	r值	-0.18	-0.57	-0.66	-0.52	-0.55
	P值	0.70	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

r: Pearson 相关系数。

表3 肺叶CT定量气道参数与肺功能的相关性

Table 3 Correlation between airway dimensions of lung lobe segmentation and pulmonary function parameters

定量CT 气道参数	FEV1%pred		FEV1/FVC		MMEF		MVV%pred	
	r值	P值	r值	P值	r值	P值	r值	P值
气道直径								
左肺上叶	-0.14	0.15	-0.19	0.06	-0.12	0.21	-0.18	0.06
左肺下叶	-0.19	0.06	-0.29	<0.001	-0.16	0.09	-0.14	0.15
右肺上叶	-0.02	0.82	-0.17	0.08	-0.05	0.56	-0.04	0.67
右肺中叶	-0.23	0.02	-0.29	<0.001	-0.29	<0.001	-0.20	0.04
右肺下叶	-0.11	0.24	-0.17	0.07	-0.11	0.26	-0.11	0.28
气道壁厚度								
左肺上叶	-0.04	0.66	-0.05	0.60	-0.02	0.80	-0.14	0.14
左肺下叶	-0.24	0.02	-0.26	<0.001	-0.21	0.03	-0.25	0.01
右肺上叶	-0.05	0.65	-0.13	0.18	-0.03	0.71	-0.16	0.10
右肺中叶	-0.28	0.01	-0.30	<0.001	-0.28	<0.001	-0.28	<0.001
右肺下叶	-0.04	0.68	-0.09	0.35	-0.01	0.86	-0.13	0.17

r: Pearson 相关系数。

预测 FEV1%pred < 50% 的灵敏度为 75.0%, 特异度为 81.0%, 预测 MVV% pred < 50% 的灵敏度为 66.2%, 特异度为 88.4%(表5)。

3 讨论

COPD 是一种异质性疾病, 不同患者的支气管、

表4 定量CT参数与肺功能指标的多元线性回归模型

Table 4 Multiple linear regression models for CT parameters in interpreting pulmonary function parameters

肺功能变量	CT参数	ANOVA分析		回归分析				调整后 R ²
		F值	P值	LAA%		气道壁厚度		
				r值	P值	r值	P值	
FEV1%pred	LAA%(左肺下叶)	36.86	0.001	-1.18	0.001	-5.83	0.002	0.42
	气道壁厚度(右肺中叶)							
FEV1/FVC	LAA%(右肺叶)	54.97	0.001	-4.12	0.001	-0.89	0.001	0.52
	气道壁厚度(右肺中叶)							
MMEF	LAA%(左肺下叶)	23.76	0.001	-0.65	0.001	-1.18	0.017	0.31
	气道直径(右肺中叶)							
MVV%pred	LAA%(左肺下叶)	28.59	0.001	-0.98	0.001	-5.52	0.002	0.35
	气道壁厚度(右肺中叶)							

肺实质以及肺血管病变表现各异, COPD 患者的肺气肿改变在 CT 图像上显示为低密度衰减区^[15], CT 值界定-950 HU 时低密度衰减区与其病理结果具有更好的相关性^[16]; 肺叶图像中低密度区与肺功能损害程度相关, 可用于预测 FEV1 的下降^[17]以及急性发作风险^[18]; 因此, CT 值低于-950 HU 区域的容积百分比被广泛用于量化肺气肿^[19-20]。小气道疾病是 COPD 的另一种表现形式, CT 扫描往往不能准确显像小气道, 有研究证实当胸部 CT 出现肺气肿征象时, 大气道的管壁厚度也可间接反映小气道病变^[21]。

近年来, 新开发的影像评估技术可以分割肺实质和气道, 进行肺气肿指数、支气管壁尺寸的定量测量, 为我们提供具体的解剖结构和病理生理信息。Shi 等^[22]依据肺部 CT 征象将 COPD 患者分为 A 型(轻微肺气肿型)、E 型(明显的肺气肿不合并支气管壁增厚型)和 M 型(肺气肿合并支气管壁增厚型), 发现其形态学表型明显不同; 而 Lee 等^[23]发现以气道阻塞为主的 COPD 患者治疗反应最佳, 而肺气肿病变为主的患者治疗效果较差。因此, 基于胸部定量 CT 参数的分析, 有助于我们深入研究 COPD 的表型以及精准评估气流受限程度, 并为不同表型及不同严重程度的 COPD 患者的个体化治疗提供依据。

肺叶具有各自的血管和气道分支, 其结构功能存在一定差异, 一些研究发现当 CT 阈值设为-950 HU 时, 胸部 CT 图像所示的肺气肿分布不同^[24-25], 管宇等^[26]也发现 COPD 患者气流受限可发生在不同肺叶。本研究表明, 左肺下叶 LAA% 最能反映气流受

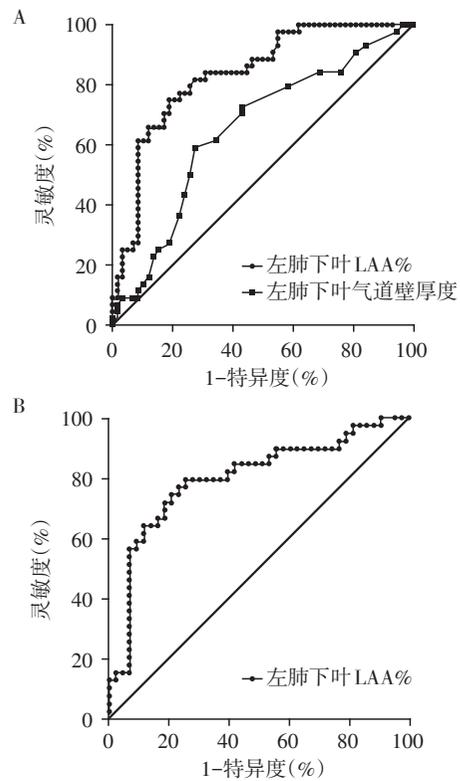


图2 定量CT参数预测 FEV1% pred < 50%(A)、MVV% pred < 50%(B)的ROC曲线

Figure 2 ROC curve of quantitative CT parameters in prediction of FEV1pred<50%(A), MVV%pred<50%(B)

限程度, 肺实质破坏越严重, 其气流受限越明显, 同时其通气储备和小气道功能越差, 而 FEV1/FVC 值的变化最能反映右肺肺气肿病变, 并且具有很好的

表5 定量CT参数预测肺功能指标的截点值、灵敏度和特异度

Table 5 Cut-off values, corresponding sensitivities and specificities of the CT parameters in predicting lung function indexes

肺功能	定量肺CT参数	截点值	精确度(%)	灵敏度(%)	特异度(%)
FEV1%pred < 50%	LAA%(左肺下叶)	13.5%	83.0	75.0	81.0
	气道壁厚度(左肺下叶)	3.35 mm	66.0	60.5	72.9
MVV%pred < 50%	LAA%(左肺下叶)	13.5%	80.0	66.2	88.4

预测效能。这可能是受到重力影响,肺上叶体积小于肺底^[12],下叶气道在呼气时关闭较早^[27],同时解剖学上左支气管细长、分叶少,气流受限更加明显;此外,本研究CT扫描是在吸气未完成,肺体积的改变可能对测量参数有一定影响。对于气道病变来说,右肺中叶气道壁厚度大小最能反映FEV1%pred、FEV1/FVC、MVV%pred变化,而MMEF主要受到右肺中叶气道直径的影响,但其关联程度较小、预测效能并不充分;同时,本研究发现随着气流受限程度的加重,分段肺的LAA%逐渐增加、气道病变加重。之前研究中,很少用定量CT参数来预测COPD患者气流受限的严重程度,本研究以左肺下叶肺气肿、气道壁厚度来预测GOLD 3~4级气流受限的程度,与Kumar等^[28]的结果比较,其预测效能、灵敏度及特异度有所提高,这可能是因为在研究把肺叶的自身结构功能差异考虑在内,进行不同肺叶及肺段定量CT指标的分析,结果更加精确;除了气流受限程度外,本研究发现左肺下叶LAA%对MVV%pred < 50%也具有很好的预测效能,这在外科手术风险、麻醉风险评估中有一定应用价值^[29],对于那些不能耐受肺功能检查的患者来说,CT检查显得尤为重要。

此外,本研究将LAA%与气道参数相结合,建立多元回归模型来进一步分析其与肺功能的关系;结果表明,LAA%与气道参数反映FEV1%pred、FEV1/FVC、MMEF、MVV%pred的拟合度较好,并且LAA联合气道参数模型与肺功能的关联性更高,可以更好地解释肺功能受损情况,这与Lederlin等^[30]的研究结果一致。然而,此回归模型只能解释部分肺功能指标的变化,这除了未考虑肺血管病变外,也反映了COPD病理变化的复杂性,需要更多研究来进一步全面探讨。

本研究将LAA%、气道定量分析扩展到肺叶、甚至肺段,在三维视图上进行定量测量,并获得各种参数的截断值,为COPD的评估提供了参考。CT定量测量在软件自动重建的基础上,联合人工矫正,获得与支气管长径垂直的横断面影像,减小了测量

误差。然而,本研究也有局限性:首先,纳入的患者数量相对较少,统计效能存在一定局限;其次,本研究的定量测量未考虑肺血管因素;另外,即使有手工矫正,也难免会有视觉误差。

总的来说,不同空间分布的LAA%、气道壁厚度、气道直径能很好地反映肺功能水平,其中左肺下叶的LAA%联合气道测量值预测气流受限程度的价值最大。

[参考文献]

- [1] SINGH D, AGUSTI A, BARNES P J, et al. Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive lung disease: the GOLD science committee report 2019[J]. *Eur Respir J*, 2019, 53(5):19000164
- [2] GAO L, YUN C M, SUN D J. Treatment and prognosis of chronic bronchitis phenotype in chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Inter J Respir*, 2018, 38(14):1084-1087
- [3] KIM V, CRAPO J, ZHAO H, et al. Comparison between an alternative and the classic definition of chronic bronchitis in COPD gene [J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2015, 12(3):332-339
- [4] ROBERTS C, WARD S, WALSTED E, et al. Safety of pulmonary function testing: data from 20 years [J]. *Thorax*, 2018, 73(4):385-387
- [5] CULVER B H, GRAHAM B L, COATES A L. Recommendations for a standardized pulmonary function report. an official american thoracic society technical statement [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196(11):1463-1472
- [6] 邹春英,王晓莲,吕培中,等. 脉冲振荡技术结合支气管舒张试验在老年慢性阻塞性肺疾病中的应用[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(2):204-206
- [7] 王飞,贺蓓. 慢性阻塞性肺疾病相关小气道病变的特点及评估和治疗[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2016, 39(6):476-479
- [8] NAMBU A, ZACH J, SCHROEDER J, et al. Quantitative computed tomography measurements to evaluate airway disease in chronic obstructive pulmonary disease: relationship to physiological measurements, clinical index and visual assessment of airway disease [J]. *Eur J Radiol*, 2016, 85(11):2144-2151

- [9] 黄宇婷,刘 翱. HRCT 定量测量与慢性阻塞性肺疾病表型的关系[J]. 中华肺部疾病杂志, 2015, 8(2): 105-107
- [10] LYNCH D A, A-QAISI M A. Quantitative computed tomography in chronic obstructive pulmonary disease [J]. *J Thorac Imaging*, 2014, 28(5): 284-290
- [11] DIJKSTRA A E, POSTMA D S, TEN HACKEN N, et al. Low-dose CT measurements of airway dimensions and emphysema associated with airflow limitation in heavy smokers: a cross sectional study [J]. *Respir Res*, 2014, 14(1): 11-20
- [12] 邵燕惠,钱 农,薛跃君,等. 慢性阻塞性肺病多排螺旋CT灌注成像的初步研究[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2007, 27(7): 748-750
- [13] LIM J U, KIM E K, LIM S Y, et al. Mixed phenotype of emphysema and airway wall thickening is associated with frequent exacerbation in chronic obstructive pulmonary disease patients [J]. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 2019, 14: 3035-3042
- [14] LOH L C, ONG C K, KOO H J, et al. A novel CT-emphysema index/FEV1 approach of phenotyping COPD to predict mortality [J]. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 2018, 13: 2543-2550
- [15] COXSON H O, DIRKSEN A, EDWARDS L D. The presence and progression of emphysema in COPD as determined by CT scanning and biomarker expression: a prospective analysis from the ECLIPSE study [J]. *Lancet Respir Med*, 2014, 1(2): 129-36
- [16] GEVENOIS P A, D E MAERTELAER V, DE VUYST P, et al. Comparison of computed density and macroscopic morphometry in pulmonary emphysema [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 1995, 152(2): 653-657
- [17] LEIPSIC J, COXSON H O, PARRAGA G, et al. Using pulmonary imaging to move chronic obstructive pulmonary disease beyond FEV1 [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2014, 190(2): 135-144
- [18] JAIRAM P M, VANDER G Y, LAMMERS J W, et al. Incidental findings on chest CT imaging are associated with increased COPD exacerbations and mortality [J]. *Thorax*, 2015, 70(8): 725-731
- [19] WANG Z, GU S, LEADER J K, et al. Optimal threshold in CT quantification of emphysema [J]. *Eur Radiol*, 2014, 23(4): 975-984
- [20] YU N, WEI X, LI Y, et al. Computed tomography quantification of pulmonary vessels in chronic obstructive pulmonary disease as identified by 3D automated approach [J]. *Medicine*, 2016, 95(40): e5095
- [21] HACKX M, BANKIER A A, GEVENOIS P A. Chronic obstructive pulmonary disease: CT quantification of airways disease [J]. *Radiology*, 2012, 265: 3448
- [22] SHI W Y, HANG J Q, ZHANG Z Y, et al. Quantitative analysis in different phenotypes of chronic obstructive pulmonary disease by the paired inspiratory and expiratory high-resolution CT [J]. *J Chin Clin Med Imag*, 2018, 29(5): 329-332
- [23] LEE J H, LEE Y K, KIM E K, et al. Responses to inhaled long-acting beta-agonist and corticosteroid according to COPD subtype [J]. *Respir Med*, 2010, 104(4): 542-549
- [24] MOON D H, PARK C H, KANG D Y, et al. Significance of the lobe-specific emphysema index to predict prolonged air leak after anatomical segmentectomy [J]. *PLoS One*, 2019, 14(11): e0224519
- [25] MATSUO K, IWANO S, OKADA T, et al. 3D CT lung volumetry using multidetector row computed tomography: pulmonary function of each anatomic lobe [J]. *J Thorac Imaging*, 2012, 27: 164-170
- [26] 管 宇,范 丽,夏 艺. 慢性阻塞性肺病患者小气道重塑及肺叶水平肺气肿的CT定量分析及其与肺功能的相关性研究[J]. 中国医学影像技术, 2015, 31(2): 181-185
- [27] 王 雷,沈 聪,邹常咏,等. 基于CT定量评估肺气肿肺叶分布特点与肺功能的相关性[J]. 西安交通大学学报(医学版), 2018, 39(6): 902-906
- [28] KUMARI I, VERMA A, JAIN A, et al. Performance of quantitative CT parameters in assessment of disease severity in COPD: A prospective study [J]. *Indian J Radiol Imaging*, 2018, 28(1): 99-106
- [29] 周明娟,郑劲平. 胸部手术前肺功能评估[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2012, 35(6): 477-479
- [30] LEDERLIN M, LAURENT F, DMMER C, et al. Mean bronchial wall attenuation value in chronic obstructive pulmonary disease: comparison with standard bronchial parameters and correlation with function [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2012, 198: 800-808

[收稿日期] 2019-11-08