

4 种评估肺气肿的 CT 指标的比较及层厚和重建方式的影响

程 挺¹, 李 勇¹, 程齐俭¹, 杨文洁², 万欢英¹

上海交通大学 医学院 1. 附属瑞金医院北院呼吸内科, 上海 201801; 2. 附属瑞金医院放射科 200025

[摘要] **目的** 探讨在慢性阻塞性肺疾病(COPD)患者中,评估肺气肿各 CT 指标与肺功能的相关性,分析层厚和重建方式对其的影响。**方法** 入选 COPD 稳定期患者 39 例,完成肺功能各项检测和吸气相胸部 CT 扫描。CT 图像以层厚 0.625、1.25、5、7.5 和 10 mm 进行标准重建,以层厚 0.625 mm 和 1.25mm 进行高频重建。用最佳阈值及默认阈值测量低衰减区比例(LAA%)、全肺像素 CT 值直方图上第 15 百分位点对应的 CT 值(Perc 15)、平均肺密度和全肺体积。分析不同层厚和重建方式对这些指标的影响,以及这些指标与肺功能的相关性。**结果** LAA% 随层厚增大而减小,高频重建高于标准重建。Perc 15、平均肺密度随层厚增加升高,高频重建低于标准重建。而全肺体积的测量所受影响较小。在各层厚及重建方式下,第 1 秒用力呼气容积(FEV_1)、 FEV_1 占预计值的百分比($FEV_1\%$ pred)、 FEV_1 占用力肺活量(FVC)的比例(FEV_1/FVC)、最大呼气中段流量占预计值的百分比(MMEF% pred)、一氧化碳弥散量(DLCO)、DLCO 占预计值的百分比(DLCO% pred)、单位弥散量占预计值的百分比(DLCO/VA% pred)与 LAA% 呈负相关($P < 0.05$),与 Perc 15 呈正相关($P < 0.05$)。 $FEV_1\%$ pred、 FEV_1/FVC 与平均肺密度呈正相关($P < 0.05$)。肺总量(TLC)、残气量(RV)、残总比(RV/TLC)与 CT 所示全肺体积呈正相关($P < 0.05$)。对于肺通气指标和弥散指标,LAA% 和 Perc 15 与其的相关性高于平均肺密度和全肺体积。对于肺容积指标,CT 所示全肺体积高于其他参数。层厚对肺气肿 CT 评估结果和肺功能的相关性影响不大;而 LAA%、Perc 15 与部分肺通气指标(如 FEV_1)的相关性,高频重建高于标准重建。**结论** 在胸部 CT 中测算 LAA%、Perc15 能较好反映肺功能中的通气和弥散指标,CT 所示全肺体积能较好反映肺功能中的容积指标。进行 CT 肺气肿评估时,应注意层厚、重建方式的同一性,若有不同,需进行相应修正。

[关键词] 慢性阻塞性肺疾病;肺气肿;CT;层厚;重建方式

[DOI] 10.3969/j.issn.1674-8115.2015.11.004 **[中图分类号]** R445.3,R563.3 **[文献标志码]** A

Comparison of four CT indexes for evaluation of emphysema and effects of section thickness and reconstruction algorithm

CHENG Ting¹, LI Yong¹, CHENG Qi-jian¹, YANG Wen-jie², WAN Huan-ying¹

1. Department of Respiratory Medicine, Ruijin Hospital North, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 201801, China; 2. Department of Radiology, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

[Abstract] **Objective** To explore the correlation between CT indexes of emphysema and lung function of patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and effects of section thickness and reconstruction algorithms. **Methods** Thirty-nine COPD patients at stable phase were selected and underwent chest CT (deep inspiratory phase) and lung function test. CT images were reconstructed by standard algorithm with section thicknesses of 0.625, 1.25, 5, 7.5, and 10 mm and by bone algorithm with section thicknesses of 0.625 and 1.25 mm. Low attenuation area percent (LAA%), the lowest 15th percentile of the histogram of attenuation values (Perc 15), mean lung density, and lung volume were measured using the best threshold and default threshold. The effects of different section thicknesses and reconstruction algorithms on indexes and the correlation between indexes and lung function were analyzed. **Results** LAA% decreased with the increase of section thickness and

[基金项目] 上海申康医院发展中心慢性病综合防治项目(SHDC12012305);上海交通大学医学院附属瑞金医院北院研究基金(2015ZY04)(Chronic Disease Prevention and Treatment Program of Shanghai Hospital Development Center, SHDC12012305; Research Foundation of Ruijin Hospital North, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, 2015ZY04)。

[作者简介] 程 挺(1988—),男,住院医师,博士;电子信箱:chengting425@126.com。

[通信作者] 程齐俭,电子信箱:chengqijian@aliyun.com。

bone algorithm was higher than standard algorithm. Perc 15 and mean lung density increased with the increase of section thickness and bone algorithm was lower than standard algorithm, while section thickness and algorithm had little effect on the measurement of lung volume. For each section thickness and reconstruction algorithm, FEV_1 , $FEV_1\%$ pred, FEV_1/FVC , $MMEF\%$ pred, $DLCO$, $DLCO\%$ pred, $DLCO/VA\%$ pred negatively correlated with LAA% ($P<0.05$) and positively correlated with Perc 15 ($P<0.05$). $FEV_1\%$ pred and FEV_1/FVC positively correlated with mean lung density ($P<0.05$). RV, TLC, and RV/TLC positively correlated with lung volume on CT ($P<0.05$). For pulmonary ventilation indexes and diffusing capacity, their correlations with LAA% and Perc 15 were higher than those with mean lung density and lung volume. For lung volume indexes, the correlations with lung volume on CT were higher than those with other parameters. The section thickness did not have obvious effect on the correlation between CT assessment of emphysema and lung function. The correlations between LAA% or Perc 15 and some pulmonary ventilation index (such as FEV_1) of bone reconstruction were higher than those of standard reconstruction. **Conclusion** LAA% and Perc 15 measured from chest CT images can ideally reflect the ventilation indexes and diffusing capacity of lung function. The lung volume on CT can ideally reflect the volume indexes of lung function. Attention should be paid to the consistency of section thickness and reconstruction algorithm when performing CT emphysema evaluation and comparison. Modifications are needed if inconsistency exists.

[Key words] chronic obstructive pulmonary disease; pulmonary emphysema; CT; section thickness; reconstruction algorithm

慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)是一种进行性发展,以持续性气流受限为特征[1]。在全球范围内 COPD 的患病率达7.6%,是世界第四大死亡原因,每年导致约300万人死亡[2]。近年来,在 COPD 患者中,CT 肺气肿评估与肺功能的相关性受到较多关注[3-5]。肺气肿的 CT 评估指标主要有4种:低于特定阈值的低衰减区比例(low attenuation area, LAA%)、全肺像素CT值直方图上某百分位点对应的CT值、平均肺密度(CT值)[3]和全肺体积[6]。胸部CT各指标的结果可因层厚及重建方式的不同而不同[7]。而4种指标与 COPD 肺气肿严重程度的相关性,及层厚、重建方式对其的影响,目前尚未得到充分的研究。本研究比较了在不同层厚和重建方式下,4种肺气肿CT评估指标与肺功能的相关性。

1 材料与方法

1.1 研究对象

筛选2010年4月至2012年1月在本院就诊的COPD稳定期患者。参照 GOLD 指南[8]制定纳入标准:①年龄>40岁。②吸烟史>20包·年(平均每日吸烟包数×吸烟年数)。③有慢性咳嗽、咳痰、气喘史。④吸入支气管舒张剂后第1秒用力呼气容积(FEV_1)占用力肺活量(FVC)的比例(FEV_1/FVC)<0.70。排除标准:①有支气管哮喘或心力衰竭史。②合并呼吸衰竭。③肺功能检查或CT扫描不能配合。④CT可见慢性阻塞性肺疾病以外的其他病变,包括肺炎、肺间质性病变、肺部结节、肿块、空洞。

⑤胸廓畸形等。本研究经伦理委员会批准,患者均签署知情同意书。患者均在1周内完成肺功能测试和胸部螺旋CT检查及临床评估,包括年龄、身高、体质量和吸烟史等。

1.2 肺功能检查

用肺功能和体积描记仪(德国 Jaeger)测定患者的通气功能和肺容积。通过单次呼吸法测定弥散功能,即一氧化碳弥散量(DLCO)。受试者在检查前12 h停用长效支气管舒张剂,检查前6 h停用短效支气管舒张剂。

1.3 胸部 CT 检查方法

检查前患者反复训练最大吸气末屏气的方法,达到最佳状态。在最大吸气末时进行肺底至肺尖的螺旋CT扫描(美国 GE, Discovery CT750 HD),扫描参数:管电压为120 kVp,管电流为240 mAs,螺距为0.984,扫描层厚和层距均为0.625 mm。将扫描所得的数据,分别以0.625、1.25、5、7.5和10 mm五种层厚,用 standard(标准)卷积函数进行重建。以0.625 mm和1.25 mm两种层厚,用 bone(高频)卷积函数进行重建。重建层距与层厚相等。

1.4 胸部 CT 的肺气肿定量评估

用 Myrian®影像分析软件对胸部CT进行三维重建,自动渲染出肺组织和气管的区域,并作手工修正。选用软件默认的CT阈值(-950 HU),以及在之前研究中得出的与肺功能相关性最高的阈值[9],测量 LAA%(指CT值低于给定阈值的肺组织体积所

占全肺体积的比例)^[3];测量全肺像素 CT 值直方图上第 15 百分位点对应的 CT 值(Perc 15)^[10, 11]、全肺体积、平均肺密度,以此评估肺气肿程度。

1.5 统计学方法

用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析。肺气肿各 CT 评估指标数据与肺功能各指标数据均呈正态分布。用随机区组设计的方差分析,分析不同层厚对肺气肿 CT 评估指标的影响,用 LSD 法进行两两比较。用配对 *t* 检验比较相同层厚下标准重建与高频重建所得肺气肿评估指标的差异,以及高频重建时两种层厚所得的肺气肿评估指标的差异。用 Pearson 相关分析检验 CT 肺气肿评估结果与肺功能的相关性。比较在最佳层厚、重建方式和阈值下 CT 肺气肿各评估结果与肺功能的相关性,若两种方法与肺功能的相关性相差 <5%,认为该两种方法效果相仿。

2 结 果

2.1 患者的一般情况

共纳入患者 39 例,均为男性,平均年龄(64 ± 6)岁,平均 FEV₁ 占预计值(48 ± 16)%,一般情况如表 1 所示。

表 2 层厚及重建方式对各项 CT 肺气肿评估指标的影响

Tab 2 Effects of section thickness and reconstruction algorithms on CT indexes for the evaluation of emphysema

指标	标准重建					高频重建	
	0.625 mm	1.25 mm	5 mm	7.5 mm	10 mm	0.625 mm	1.25 mm
LAA%	—	-0.16SD	-0.31SD	-0.39SD	-0.46SD	0.47SD	0.05SD
Perc 15	—	0.18SD	0.37SD	0.48SD	0.57SD	-0.50SD	-0.06SD
平均肺密度	—	0.26SD	0.50SD	0.69SD	0.88SD	-0.51SD	-0.13SD
全肺体积	—	0.04SD	0.08SD	0.10SD	0.13SD	0.09SD	0.15SD

注:表中数据为各层厚和重建方式下的各项 CT 肺气肿评估指标与层厚 0.625 mm 标准重建下所得相应指标的差值,除以层厚 0.625 mm 标准重建所得该指标的标准差后的结果。SD:层厚 0.625 mm 标准重建下所得该指标的标准差。标准重建下,同一指标不同层厚所得数值间差异均有统计学意义($P < 0.001$)。高频重建下,同一指标层厚 0.625 mm 和层厚 1.25 mm 时所得数值间差异有统计学意义($P < 0.001$)。层厚 0.625 mm 及层厚 1.25 mm 时,同一指标标准重建和高频重建所得数值间差异均有统计学意义($P < 0.001$)。

2.3 各层厚和重建方式下 CT 肺气肿评估指标与肺功能的相关性

在各层厚及重建方式下,最佳阈值和默认阈值(-950 HU)所得 LAA% 与 FEV₁、FEV₁ 占预计值的百分比(FEV₁% pred)、FEV₁/FVC、最大呼气中段流量占预计值的百分比(MMEF% pred)、DLCO、DLCO 占预计值的百分比(DLCO% pred)、单位弥散量占预

表 1 纳入研究患者的一般情况

Tab 1 General information of enrolled patients

项目	$\bar{x} \pm s$
年龄/岁	64 ± 6
BMI/(kg/m ²)	21 ± 2
吸烟史/(包·年)	46 ± 22
FEV ₁ /L	1.3 ± 0.5
FEV ₁ 占预计值百分比/%	48 ± 16
FVC/L	3.2 ± 0.6
FEV ₁ /FVC(/%)	41 ± 9
MMEF 占预计值百分比/%	13 ± 7
RV/TLC(/%)	61 ± 8
DLCO 占预计值百分比/%	48 ± 17
DLCO/VA 占预计值百分比(/%)	60 ± 22

注:MMEF 为最大呼气中段流量;RV 为残气量;TLC 为肺总量;RV/TLC 为残总比;DLCO/VA 为单位弥散量。

2.2 层厚、重建方式对 CT 肺气肿评估指标的影响

对于给定阈值,LAA% 随层厚增大而减小,高频重建高于标准重建。Perc 15 和平均肺密度随层厚增加而升高,高频重建低于标准重建。CT 所示全肺体积随层厚增加而略增加,高频重建者略小于标准重建。不同层厚、重建方式之间差异均有统计学意义($P < 0.001$)(表 2)。

计值的百分比(DLCO/VA% pred)呈负相关($P < 0.05$),与 RV 呈正相关($P < 0.05$)。Perc 15 与 FEV₁、FEV₁% pred、FEV₁/FVC、MMEF% pred、DLCO、DLCO% pred、DLCO/VA、DLCO/VA% pred 呈正相关($P < 0.05$)。平均肺密度与 FEV₁% pred、FEV₁/FVC 呈正相关($P < 0.05$),与 RV 呈负相关($P < 0.05$)。CT 所示全肺体积与 TLC、RV、RV/TLC 呈正相关

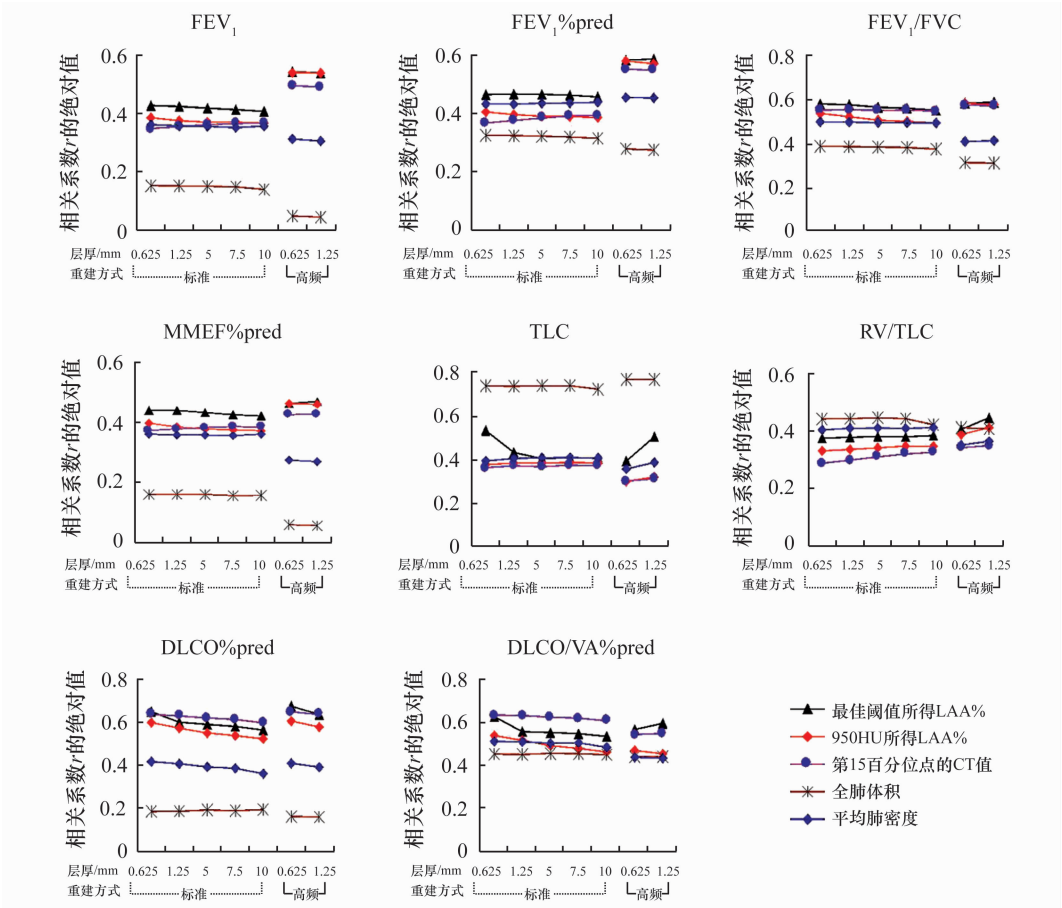
($P < 0.05$) (图 1,表 3)。

2.4 层厚和重建方式对 CT 肺气肿评估指标与肺功能的相关性的影响

层厚对 CT 肺气肿评估结果和肺功能的相关性影响不大,但 LAA%、Perc 15 与 FEV_1 、 FEV_1/FVC 、MMEF 等指标的相关性,高频重建高于标准重建(图 1)。

2.5 各 CT 肺气肿评估指标的比较

对于肺通气指标(FEV_1 、 $FEV_1\%$ pred、 FEV_1/FVC 、MMEF、MMEF% pred)和弥散指标(DLCO、DLCO% pred、DLCO/VA、DLCO/VA% pred),LAA%、Perc 15 与之的相关性高于平均肺密度和全肺体积。对于肺容积指标(RV、TLC、RV/TLC),CT 所示全肺体积与之相关性高于其他指标(图 1,表 3)。



注: 最佳阈值和默认阈值(- 950 HU)所得 LAA% 与 FEV_1 、 $FEV_1\%$ pred、 FEV_1/FVC 、MMEF% pred、RV、DLCO、DLCO% pred、DLCO/VA% pred 的相关性,Perc 15 与 FEV_1 、 $FEV_1\%$ pred、 FEV_1/FVC 、MMEF% pred、DLCO、DLCO% pred、DLCO/VA、DLCO/VA% pred 的相关性,CT 所示肺体积与 TLC、RV、RV/TLC 的相关性,平均肺密度与 $FEV_1\%$ pred、 FEV_1/FVC 、RV 的相关性,在各层厚及重建方式下均有统计学意义($P < 0.05$)。

图 1 CT 肺气肿评估指标和肺功能的相关性

Fig 1 Correlations between CT indexes for evaluation of emphysema and lung function

表 3 最佳层厚、重建方式及阈值下 CT 各评价指标与肺功能的相关性

Tab 3 Correlations between CT evaluation indexes and lung function under best section thickness, reconstruction algorithm, and threshold

项目	LAA% (r 值)	所用层厚(mm) /重建方式/ 阈值(HU)	Perc 15 (r 值)	所用层厚(mm)/ 重建方式	平均肺 密度(r 值)	所用层厚(mm)/ 重建方式	全肺 体积(r 值)	所用层厚(mm)/ 重建方式
FEV_1	-0.545	0.625/高频/ -960	0.496	0.625/高频	0.362	0.625/标准	-	-
$FEV_1\%$ pred	-0.588	1.25/高频/ -930	0.553	0.625/高频	0.454	0.625/高频	-	-
FEV_1/FVC	-0.590	1.25/高频/ -930	0.577	0.625/高频	0.501	0.625/标准	-0.391	0.625/标准
MMEF% pred	-0.468	1.25/高频/ -940	0.428	1.25/高频	0.361	0.625/标准	-	-
TLC	0.535	0.625/标准/ -990	-0.376	7.5/标准	-0.411	7.5/标准	0.769	1.25/高频

续表 3

项目	LAA% (<i>r</i> 值)	所用层厚(mm) /重建方式/ 阈值(HU)	Perc 15 (<i>r</i> 值)	所用层厚(mm)/ 重建方式	平均肺 密度(<i>r</i> 值)	所用层厚(mm)/ 重建方式	全肺 体积(<i>r</i> 值)	所用层厚(mm)/ 重建方式
RV/TLC	0.449	1.25/高频/ -980	-	-	-0.414	0.625/高频	0.449	5/标准
DLCO% pred	-0.676	0.625/高频/ -990	0.649	0.625/高频	0.416	0.625/标准	-	-
DLCO/VA% pred	-0.625	1.25/标准/ -990	0.633	0.625/标准	0.510	0.625/标准	-0.454	5/标准

注：- 表示相关性无统计学意义。

3 讨 论

CT 能较好地显示肺部的组织结构,反映肺部的病理改变,是 COPD 重要的评估手段^[4]和鉴别诊断手段^[12]。肺气肿是 COPD 主要的病理改变。肺功能是 COPD 诊断的金标准,是 COPD 重要的评估指标。本研究比较了在 COPD 患者的 CT 肺气肿评估中,各指标所得结果与肺功能的相关性及其影响因素。

肺气肿在病理上表现为终末支气管远端部分不可逆性膨胀伴肺泡壁、气道壁损害。肺气肿在 CT 上表现为正常密度的肺组织中局限的低密度区^[3]。LAA% 可用来反映肺气肿的程度。陈淮等^[13]的研究显示:无论以 -910 HU 或 -950 HU 作为阈值,在深吸气末或深呼气末,LAA% 均与 FEV₁%、FVC%、FEV₁/FVC、肺活量(VC)呈负相关,与 TLC、RV、RV/TLC 呈正相关。Hayhurst 等^[14]发现,肺气肿患者的胸部 CT 与健康者相比,肺组织的 CT 值分布曲线明显左移,即偏向 CT 值小的方向。可用 Perc 15 来评估肺气肿程度。Mets 等^[15]的研究显示,Perc 15 与 FEV₁、FEV₁/FVC、DLCO 呈正相关,而与 RV/TLC 呈负相关。且 Perc 15 是评估肺气肿变化的最佳指标^[16]。肺含气增多而正常组织减少,表现为肺密度降低。Coxson 等^[17]用肺密度的倒数(mL/g)来表示肺的膨胀程度。全肺膨胀程度可以准确地预测肺组织的比表面积。CT 预计的比表面积与肺弥散能力呈显著正相关。李一鸣等^[18]的研究显示:平均肺密度随着 COPD 病情的加重、分级的增高呈逐渐降低趋势,COPD 组显著低于正常对照组。肺气肿在大体上表现为肺组织过度充气,肺体积增大,在体征上表现为桶状胸,肺下界下移,胸片示横隔低平。CT 能准确地计算全肺的体积,故该指标也可用于评估肺气肿。蒙秋华等^[19]研究显示:COPD 患者的肺体积显著大于正常对照,全肺体积随 COPD 患者的严重程度增大。

胸部 CT 可按多种参数进行。常规/薄层 CT 常用 5 ~ 10 mm 的层厚标准重建;高分辨 CT 常用 0.625 ~ 1.25 mm 的层厚高频重建。各研究中所用 CT 的层

厚、重建方式、低密度区判定阈值也各不相同。多名学者^[20-24]在计算 LAA% 时所用层厚 0.625 ~ 10 mm 不等,重建方式也不尽相同。研究^[25]表明,层厚、重建方式对 LAA% 有显著影响。邢志珩等^[26]的研究证实,与标准重建相比,高频重建时,肺气肿指数(即 LAA%)增加,平均肺密度降低,而对 CT 所示全肺体积影响不大。但层厚、重建方式对于 Perc 15、平均肺密度、全肺体积的综合影响目前仍鲜有研究。

本研究显示,对于给定阈值,LAA% 随层厚增大而减小,高频重建高于标准重建。Perc 15 和全肺平均 CT 值随层厚增加而升高,高频重建低于标准重建。全肺体积随层厚增加而略增加,高频重建略小于标准重建。因此,在比较或研究患者的肺气肿程度时,需注意重建方式与层厚的一致性。当重建方式或层厚不一致时,可以参照以上规律,进行定性判断。

因 CT 的空间分辨率有限,测得的肺组织 CT 值是该区域肺泡气体、肺泡壁、支气管壁和血管的平均值,即出现部分容积效应^[27]。容积效应随层厚增加而增大,高频重建低于标准重建。容积效应使肺气肿区域的 CT 值升高,低于判定阈值的肺气肿区域减少,即 LAA% 减小;肺组织 CT 值分布曲线右移,Perc 15 升高^[25]。容积效应又使部分小支气管、血管的 CT 值降低,被算入肺组织中,使测得的平均肺密度增加,全肺体积略有增加。故层厚越厚、重建锐度越小,LAA% 越低,Perc 15、平均肺密度越高和全肺体积略高。

LAA% 直接反映了肺气肿的病理表现,Perc 15 反映了肺气肿区域的整体情况;而平均肺密度、全肺体积则反映了肺气肿病变对全肺的影响^[28]。故对于大多数肺通气、弥散指标,LAA% 和 Perc 15 与之相关性最高。CT 所示肺容积直接反映了全肺体积,故肺容积指标(RV、TLC、RV/TLC)与之相关性最高。因此对于常规通气、弥散功能的预测或评价,建议使用 LAA% 或 Perc 15;而对于肺容积指标的预测或评价,建议使用 CT 所示肺容积。

本研究显示,LAA% 与肺通气、弥散指标呈负相

关,与肺容积、残总比等指标呈正相关。Perc 15、平均肺密度与肺通气、弥散指标呈正相关,与肺容积、残总比等指标呈负相关。全肺体积与肺容积、残总比等指标呈正相关。对于肺通气指标、弥散指标, LAA%、Perc 15 与之相关性高于平均肺密度和全肺体积。对于部分通气指标, LAA% 更高于 Perc 15。对于肺容积指标, CT 所示全肺体积高于其他参数。层厚对 CT 肺气肿评估结果和肺功能的相关性影响不大;而 LAA%、Perc 15 与部分肺通气指标(如 FEV_1) 的相关性,高频重建好于标准重建。本研究提示,在胸部 CT 中测算 LAA%、Perc15 能较好反映肺功能中的通气、弥散指标;而测量 CT 所示肺体积能较好反映肺功能中的容积指标。进行 CT 肺气肿评估时,应注意层厚、重建方式的同一性;若有不同,需注意修正。

[参考文献]

- [1] Global Strategy for the Diagnosis, Management and Prevention of COPD. Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD) [EB/OL]. (2011-02-21) http://www.goldcopd.org/uploads/users/files/GOLD_Report_2011_Feb21.pdf.
- [2] Mathers C, Fat DM, Boerma JT. The global burden of disease: 2004 update[M]. Geneva: World Health Organization, 2008.
- [3] Litmanovich D, Boisselle PM, Bankier AA. CT of pulmonary emphysema-current status, challenges, and future directions[J]. Eur Radiol, 2009, 19(3): 537-551.
- [4] 姜艳平, 赵云峰, 赵秋良. CT 对慢性阻塞性肺疾病临床评估的价值[J]. 临床肺科杂志, 2014, 19(9): 1684-1685, 1686.
- [5] 张艳, 李永怀, 费广鹤. HRCT 定量测量在 COPD 的应用[J]. 临床肺科杂志, 2013, 18(2): 319-321.
- [6] 张伟宏, 牟文斌, 朱杰敏, 等. CT 肺功能成像技术研究[J]. 中华放射学杂志, 2001, 35(11): 832-836.
- [7] Kemerink GJ, Kruijs HH, Lamers RJ, et al. CT lung densitometry: dependence of CT number histograms on sample volume and consequences for scan protocol comparability[J]. J Comput Assist Tomogr, 1997, 21(6): 948-954.
- [8] Rabe KF, Hurd S, Anzueto A, et al. Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease: GOLD executive summary[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2007, 176(6): 532-555.
- [9] 程挺, 程齐俭, 周敏, 等. 慢性阻塞性肺疾病肺气肿改变的 CT 评估——不同层厚及卷积函数重建对其与肺功能相关性的影响[J]. 实用放射学杂志, 2013, 29(9): 1419-1425.
- [10] Stolk J, Dirksen A, van der Lugt AA, et al. Repeatability of lung density measurements with low-dose computed tomography in subjects with alpha-1-antitrypsin deficiency-associated emphysema [J]. Invest Radiol, 2001, 36(11): 648-651.
- [11] Mohamed HF, de Hoop B, Zanen P, et al. CT-quantified emphysema in male heavy smokers: association with lung function decline[J]. Thorax, 2011, 66(9): 782-787.
- [12] 左美容, 贺卫国. 胸部 CT 检查 COPD60 例临床分析[J]. 临床肺科杂志, 2013, 18(3): 559.
- [13] 陈淮, 郑劲平, 周洁, 等. 低剂量多层螺旋 CT 扫描对慢性阻塞性肺病患者肺功能的定量分析价值[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2012, 35(4): 291-292.
- [14] Hayhurst MD, MacNee W, Flenley DC, et al. Diagnosis of pulmonary emphysema by computerised tomography[J]. Lancet, 1984, 2(8398): 320-322.
- [15] Mets OM, Murphy K, Zanen P, et al. The relationship between lung function impairment and quantitative computed tomography in chronic obstructive pulmonary disease[J]. Eur Radiol, 2012, 22(1): 120-128.
- [16] Dirksen A. Monitoring the progress of emphysema by repeat computed tomography scans with focus on noise reduction[J]. Proc Am Thorac Soc, 2008, 5(9): 925-928.
- [17] Coxson HO, Hogg JC. Erratum: a quantification of the lung surface area in emphysema using computed tomography[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2001, 163(6): 1500-1501.
- [18] 李一鸣, 尹建忠, 杨文杰, 等. 多层螺旋 CT 低剂量扫描对阻塞性肺疾病分级定量测量的初步研究[J]. 国际医学放射学杂志, 2012, 35(5): 413-417, 429.
- [19] 蒙秋华, 陈娇香, 曾庆思, 等. 慢性阻塞性肺疾病的肺气肿 CT 测量与肺功能分度的相关性研究[J]. 实用放射学杂志, 2012, 28(10): 1530-1533.
- [20] 牛朋影, 哈若水, 郭玉峰. 呼吸双相结合 CT 扫描在慢性阻塞性肺疾病诊断中的临床价值[J]. 实用放射学杂志, 2012, 28(6): 853-855, 872.
- [21] Muller NL, Staples CA, Miller RR, et al. "Density mask". An objective method to quantitate emphysema using computed tomography [J]. Chest, 1988, 94(4): 782-787.
- [22] 陈淑靖, 顾宇彤, 张静, 等. 胸部低剂量 CT 定量指标与肺气流受限的相关性分析[J]. 国际呼吸杂志, 2012, 32(11): 833-837.
- [23] Han MK, Kazerooni EA, Lynch DA, et al. Chronic obstructive pulmonary disease exacerbations in the COPD gene study: associated radiologic phenotypes[J]. Radiology, 2011, 261(1): 274-282.
- [24] 张洁, 于铁链, 吴琦, 等. 多层螺旋 CT 定量研究慢性阻塞性肺疾病肺衰减值[J]. 中国医学影像技术, 2008, 24(10): 1611-1614.
- [25] Gierada DS, Bierhals AJ, Choong CK, et al. Effects of CT section thickness and reconstruction kernel on emphysema quantification relationship to the magnitude of the CT emphysema index[J]. Acad Radiol, 2010, 17(2): 146-156.
- [26] 邢志珩, 万业达, 范勇, 等. 不同重建算法对肺气肿 CT 定量测量的影响[J]. 实用放射学杂志, 2013, 29(9): 1434-1437.
- [27] 郭启勇. 实用放射学[M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
- [28] Matsuo S, Yamashiro T, Washko GR, et al. Quantitative CT assessment of chronic obstructive pulmonary disease[J]. Radiographics, 2010, 30(1): 55-66.

[收稿日期] 2015-07-30

[本文编辑] 瞿麟平