DOI:10.19893/j.cnki.ydyxb.2025-0026

基于定量CT对吸烟者肺部损伤的定量研究

巨文璇,雷佳讯,冀韩英,李建龙*

(延安大学附属医院,陕西 延安 716000)

摘 要:目的 采用CT参数效应图评估吸烟者肺结构损伤特征,筛选早期肺损伤的敏感影像学指标。**方法** 前瞻性收集延安大学附属医院2023年1月至11月无症状受试者221例,依据吸烟指数(SI=每日吸烟支数×吸烟年数)分为非吸烟组(NS,n=77)、低吸烟指数组(LS,SI<400,n=54)及高吸烟指数组(HS,SI≥400,n=90)。所有受试者行呼、吸双气相胸部CT扫描,通过数字肺定量软件获得CT参数效应图指标。组间比较采用单因素方差分析或非参数检验。采用Pearson分析或Spearman相关性和线性回归分析吸烟指数与CT参数效应图指标的关系,P<0.05差异具有统计学意义。**结 果** 三组间CT参数效应图指标差异均有统计学意义(P<0.001),且随吸烟指数升高呈上升趋势。PRM^{fsad}%与吸烟指数存在相关性(r=0.324,P<0.001),线性回归显示吸烟指数是PRM^{fsad}%独立正向影响因素(β=0.324,P<0.001)。**结 论** CT参数效应图的PRM^{fsad}%是评估吸烟早期肺损伤的敏感指标,为临床早期干预提供客观依据。

关键词:定量CT;吸烟指数;参数效应图;小气道病变;早期肺损伤

中图分类号:R563.9;R816.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2639(2026)01-0064-05

Quantitative study based on quantitative CT in lung damage of smokers

*JU Wenxuan, LEI Jiaxun, JI Hanying, LI Jianlong**

(Yan′an University Affiliated Hospital, Yan′an 716000, China)

Abstract: Objective To assess lung structural injury in smokers using CT parametric response map (PRM) and identify sensitive imaging biomarkers for early lung injury detection. **Methods** 221 asymptomatic subjects from Yan′an University Affiliated Hospital (January to November, 2023) were prospectively enrolled. Participants were stratified by smoking index (SI=cigarettes/day×smoking years) into: non-smoking (NS, n=77), low smoking index (LS, SI<400, n=54), and high smoking index (HS, SI≥400, n=90) groups. All subjects underwent paired inspiratory-expiratory chest CT scans. CT PRM metrics were quantified using digital lung analysis software. Inter-group comparisons used ANOVA or non-parametric tests. Relationships between SI and PRM metrics were evaluated via pearson/spearman correlation and linear regression (statistical significance: P<0.05). **Results** PRM metrics differed significantly across groups (P<0.001), showing progressive increases with higher SI. PRM^{fSAD}% correlated with SI (r=0.324, P<0.001). Linear regression identified SI as an independent positive predictor of PRM^{fSAD}% (β=0.324, P<0.001). **Conclusion** PRM^{fSAD}% is a sensitive CT biomarker for early smoking-related lung injury, providing an objective basis for clinical intervention.

Key words: Quantitative CT; Smoking index; Parametric response map; Small airway lesions; Early lung injury

据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)2024年的数据显示,吸烟每年导致超过800万人死亡,是肺部疾病的首要危险因素[1]。吸烟早期会损伤支气管内的纤毛功能,导致有害物质滞留,引起

基金项目:陕西省重点研发计划(2021SF-254)

作者简介:巨文璇(2001—),女,陕西咸阳人,在读硕士研究生。研究方向:胸部影像学。

* **通信作者:**李建龙(1966—),男,陕西西安人,主任医师。研究方向:胸部影像学。E-mail:3270539930@qq.com

小气道阻塞和肺泡损伤，最终导致慢性阻塞性肺疾病（chronic obstructive pulmonary disease，COPD）[2]。

尽管肺功能检测是评估肺损伤的金标准，但早期吸烟者肺功能无显著异常[3]。定量CT能够发现并且精准评估肺结构的损伤[4]。基于双气相配准的CT参数效应图在评估肺气肿、小气道病变方面，具有更高的敏感性[5]。本研究采用双气相配准的CT参数效应图，分析吸烟患者肺结构损伤情况，筛选早期肺损伤的敏感指标，为临床早期诊断与干预提供可靠依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

前瞻性纳入延安大学附属医院2023年1月至2023年11月进行呼、吸双气相胸部CT扫描的健康体检者221例（30~75岁）。纳入标准：① 无呼吸系统疾病且肺功能正常（FEV1/FVC≥70%）；② 吸气及呼气双相CT图像完整；肺裂显示清晰。根据吸烟指数[6]（SI=每天吸烟支数×吸烟年数）。分组为非吸烟组（none smoke，NS）77例、低吸烟指数组（low smoke，LS）54例，SI<400及高吸烟指数组（high smoke，HS）90例，SI≥400。排除标准：① 患者配合差，图像不清晰；② 先天性胸部疾病患者或者接受胸部手术者、弥漫性支气管扩张、既往化疗和/或放射治疗史、肺部恶性疾病、肺部感染、胸腔积液等影响数据测量的有呼吸系统相关疾病患者；③ 年龄30岁以下或75岁以上的患者。本研究通过伦理委员会批准（批准号：2018032），所有受试者均知情并签署了知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 *扫描方法* 采用上海联影科技有限公司生产的UCT-760 128层螺旋CT进行扫描，对被检查者进行呼吸训练，按照指令，分别在深吸气末与用力呼气末屏住呼吸的同时进行扫描；扫描体位为仰卧位并双手抱头，所有检查者分别在深吸气末与用力呼气末屏住呼吸的同时进行全肺扫描；扫描参数：管电压120 KV，自适应动态管电流（范围30~40 mAs），准直器宽度128 mm×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，双气相图像分别重建1 mm薄层。

1.2.2 *图像后处理及定量测量* 经数字肺平台将呼、吸双气相图像进行配准，基于CT参数效应图（PRM）计算得出以下指标：肺气肿区域百分比（percentage of emphysema area，PRM^{Emph}%）以吸气相小于-950 Hu、呼气相小于-856 Hu的像素占全肺容积的百分比；功能性小气道病变区域百分比（percentage of functional small airway disease，PRM^{fSAD}%）以吸气相大于-950 Hu、呼气相小于-856 Hu的像素占全肺容积的百分比；正常肺组织区域百分比（percentage of normal lung tissue area，PRM^{Normal}%）以呼气相大于-856 Hu、吸气相大于-950 Hu的像素占全肺容积的百分比[7]。肺密度测定法是肺组织、血液量、肺内气体、血管外液等综合密度的反映，通常用平均CT值来表示其大小[8]，包括吸气相平均肺密度（MLD_{in}）呼气相平均肺密度（MLDex）及呼气相与吸气相平均肺密度之比（$MLD_{ex/in}$）。

1.3 统计学方法

应用SPSS 26.0统计分析软件，计量资料均以（$\bar{x}\pm s$）表示，满足正态分布的变量采用单因素方差分析，不满足者采用非参数秩和检验。组间比较采用单因素方差分析或非参数检验。采用Pearson分析或Spearman相关性和线性回归分析吸烟指数与CT参数效应图指标的关系，P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 三组间CT参数效应图指标的比较

三组间所有的定量CT指标差异均有统计学意义（P<0.001），并且随着吸烟指数的升高，PRM^{Emph}%和PRM^{fSAD}%随之升高，PRM^{Normal}%降低。不吸烟组和高吸烟组间差异显著（P<0.001）；不吸烟组和低吸烟组间MLDin、MLDex及PRM^{Emph}%有显著差异（P<0.001，表1）。

2.2 吸烟指数与CT参数效应图的指标相关性分析

吸烟指数与MLDin（r=0.051，P=0.050）、MLDex（r=0.295，P<0.001）、PRM^{Emph}%（r=0.236，P<0.001）和PRM^{fSAD}%（r=0.324，P<0.001）呈正相关，与$MLD_{ex/in}$（r=-0.254，P<0.001）和PRM^{Normal}%（r=-0.301，P<0.001）呈负相关（表2）。

2.3 吸烟指数与定量CT指标线性回归分析

将吸烟指数作为自变量，CT参数效应图指标为因变量进行线性回归分析发现：吸烟指数是PRM^{fsad}%（β=0.324，P<0.001，β=0.324，P<0.001）、PRM^{Emph}%（β=0.236，P<0.01，β=0.236，P<0.01）及MLDex（β=-0.254，P<0.001，β=-0.254，P<0.001）的独立影响因素（表3）。

表 1　不同吸烟指数组间定量 CT 指标比较

指标	NS(n=77)	LS(n=54)	HS(n=90)	F/H	P
MLDin	−812. 9±48. 6$^{\#\&}$	−833. 4±36. 9$^{\#}$	−833. 7±44. 9$^{\&}$	14. 269	0. 006
MLDex	−676. 8±54. 6$^{\#\&}$	−701. 8±64. 1$^{\#*}$	−731. 6±70. 1$^{\&*}$	29. 321	<0. 001
MLDex/in	0. 83±0. 07$^{\&}$	0. 84±0. 78*	0. 88±0. 7$^{\&*}$	20. 032	<0. 001
PRM^{normal}%	74. 3%±14. 1$^{\&}$	69. 8%±18. 3*	61. 2%±20. 7$^{\&*}$	18. 305	<0. 001
PRM^{empha}%	3. 4%±2. 9$^{\#\&}$	5. 3%±5. 7$^{\#*}$	8. 2%±7. 6$^{\&*}$	23. 926	<0. 001
PRM^{fsad}%	12. 8%±7. 3$^{\&}$	16. 6%±11. 5*	23. 7%±14. 3$^{\&*}$	31. 785	<0. 001

注：MLDin：吸气相双肺平均密度；MLDex：呼气相双肺平均密度；MLDex/in：呼气相双肺密度与吸气相双肺密度比值；PRM^{normal}%：双肺正常占比；PRM^{empha}%：双肺肺气肿占比；PRM^{fsad}%：双肺小气道病变占比。NS：非吸烟组；LS：低吸烟指数组；HS：高吸烟指数组；P<0. 05 表示差异具有统计学意义。#表示 NS 组与 LS 组数值间比较；*表示 LS 组与 HS 组数值间比较；&表示 HS 组与 NS 组数值间比较。

表 2　CT 参数效应图指标与吸烟指数的相关性分析

变量	MLDin	MLDex	MLDex/in	PRM^{normal}%	PRM^{empha}%	PRM^{fsad}%
吸烟指数	0. 051(P=0. 050)	0. 295(P<0. 001)	−0. 254(P<0. 001)	−0. 301(P<0. 001)	0. 236(P=0. 002)	0. 324(P<0. 001)

注：MLDin：吸气相双肺平均密度；MLDex：呼气相双肺平均密度；MLDex/in：呼气相双肺密度与吸气相双肺密度比值；PRM^{normal}%：双肺正常占比；PRM^{empha}%：双肺肺气肿占比；PRM^{fsad}%：双肺小气道病变占比。

表 3　吸烟指数与定量 CT 指标线性回归

变量	B	β	(95%CI)	P
MLDin	0. 005	0. 051	0. 051	0. 505
MLDex	−0. 042	−0. 254	−0. 254	<0. 001
MLDex/in	5. 52	0. 295	0. 259	<0. 001
PRM^{normal}%	−0. 015	−0. 301	−0. 301	<0. 001
PRM^{empha}%	0. 004	0. 236	0. 236	0. 002
PRM^{fsad}%	0. 011	0. 324	0. 324	<0. 001

注：MLDin：吸气相双肺平均密度；MLDex：呼气相双肺平均密度；MLDex/in：呼气相双肺密度与吸气相双肺密度比值；PRM^{normal}%：双肺正常占比；PRM^{empha}%：双肺肺气肿占比；PRM^{fsad}%：双肺小气道病变占比。95%CI：95% 置信区间。

3　讨论

长期吸烟会导致呼吸道和肺实质结构的改变，成为 COPD 等肺部阻塞性疾病的重要致病因素。然而，在吸烟早期，患者通常尚无明显症状或肺功能异常，只有当肺组织损伤达到 30% 或以上时肺功能才出现异常[9]。因此需要更为敏感的检测方法，以便于及早识别肺组织的结构性损伤，从而为预防后续肺部疾病进展提供依据。

本研究结果显示随着吸烟指数的升高(即吸烟量和吸烟年限的增加)，定量 CT 各项指标，包括吸气相与呼气相的 MLD、PRM^{Emph}%及 PRM^{fSAD}%均呈上升趋势，提示吸烟程度加重时肺损伤也随之加剧，这与朱彦瑾等[10]的研究结果一致。此外，有研究[11]指出在无症状吸烟人群中，吸烟行为可以加重气道炎症的进程，导致 CT 肺密度升高，这与本研究结果类似。吸烟不仅加重炎症，还可导致气道数量减少，这主要归因于烟雾颗粒中的许多有害物质诱发小气道发生慢性炎症，黏膜下腺体组织增生肥大及分泌黏液量增多，进而导致气道重塑，特别是气道壁纤维化的发生，从而使小气道完全阻塞并失去功能[12]。

在定量分析中，吸气相的定量 CT 指标 MLDin 在非吸烟组、低吸烟指数组、高吸烟指数组间较呼气相指标 MLDex 差异性更具有统计学意义，表明吸气相 CT 扫描较呼气相对于小气道病变的检测具有较高敏感性。既往研究[13]亦显示，联合呼气相与吸气相 CT 扫描可更有效地识别吸烟引发的小气道异常及空气潴留等细微病变。

本研究进一步发现 PRM^{fSAD}%与吸烟指数相关性最强，其次为 PRM^{Emph}%，提示吸烟早期肺部结构损伤以小气道病变为主，且先于肺实质的改变，Huang 等[14]和 Byon 等[15]也均证实了上述结论。Chen 等[16]通过高分辨率计算机断层扫描(high-resolution computed tomography，HRCT)联合参数反应图谱(parameter response map，PRM)对小气道功能障碍进行分析，发现 PRM 对早期的肺功能障碍更加敏感。此外，Pompe 等[17]使用肺密度分析仪对肺组织进行量化，证实 PRM 参数与肺功能指标等临床参数均密切相关，Bhatt 等[18]和 Galbán 等[19]则基于 HRCT 使用双气相配准法进一步验证 PRM^{fSAD}%与 FEV_1 的下降密切相关。Vasilescu 等[20]及 Verleden

等[21]人使用显微CT分析COPD患者和正常人的肺组织证实PRM^{fSAD}%与小气道的狭窄及肺气肿密切相关，并且不需要进行病理学检查对照，这进一步确定了PRM^{fSAD}%可作为早期小气道损伤的重要影像学指标，这与本研究结论一致，即PRM，尤其PRM^{fSAD}%，不仅与肺功能密切相关，且对于早期吸烟相关肺损伤具有较高敏感性，为早期肺损伤筛查和评估提供了独立且有效的影像学依据。Abu Hassan等[22]对一组有症状的吸烟者进行随访，劝导其戒烟并监测后续的呼吸系统相关症状，结果显示随着戒烟后随时间延长，其呼吸道症状（咳嗽、咳痰和呼吸困难）有所减轻，这一发现强调了及早戒烟及坚持戒烟对吸烟患者的健康具有长远益处。

2023年全球慢性阻塞性肺疾病（global initiative for chronic obstructive lung disease，GOLD）倡议报告也进一步强调了CT在稳定期COPD患者评估中的重要作用[23]，本研究中补充证实了定量CT在评估早期吸烟相关肺损伤，尤其是肺功能仍正常个体中的应用价值。

在本研究过程中存在一定局限性，首先，研究未收集相关的组织学样本无法对PRM指标与肺气肿或小气道病变进行直接对照验证。其次，定量CT测量存在一定辐射暴露，限制其在大规模筛查中的推广应用。再次，随着年龄增长，肺部结构也会发生改变，本研究未排除年龄对CT参数的影响，后续研究中可进一步按年龄分层，比较各项指标间的差异。

综上所述，本研究证实，吸烟程度越高，肺部损伤越显著。定量CT，尤其PRM^{fsad}%，在检出肺功能正常吸烟患者早期肺部损伤方面有重要作用，可作为临床早期筛查、疾病评估及疗效监测的重要指标。

参考文献：

[1]CHRISTENSON S A, SMITH B M, BAFADHEL M, et al. Chronic obstructive pulmonary disease[J]. Lancet, 2022, 399(10342):2227-2242.

[2]BÄCKLIN E, GONON A, SKÖLD M, et al. Pulmonary volumes and signs of chronic airflow limitation in quantitative computed tomography[J]. Clinical Physiology and Functional Imaging, 2024, 44(4):340-348.

[3]RITCHIE A I, DONALDSON G C, HOFFMAN E A, et al. Structural predictors of lung function decline in young smokers with normal spirometry[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2024, 209(10): 1208-1218.

[4]NIE Z H, VONDER M, DE VRIES M, et al. Co-occurrence of bronchiectasis, airway wall thickening, and emphysema in Chinese low-dose CT screening[J]. European Radiology, 2025, 35(7):3823-3832.

[5]章玲惠，樊树峰. 双气相定量CT在肺部疾病中的研究进展[J]. 浙江医学，2022，44(11)：1234-1238.

[6]任涛，李静，王雷. 基于CT体素的形态测量建立列线图预测慢性阻塞性肺疾病严重程度[J]. CT理论与应用研究（中英文），2025，34(5)：936-942.

[7]CHEN B, LIU Z Y, LU J J, et al. Deep learning parametric response mapping from inspiratory chest CT scans: A new approach for small airway disease screening[J]. Respiratory Research, 2023, 24(1):299.

[8]MASCALCHI M, CAMICIOTTOLI G, DICIOTTI S. Lung densitometry: Why, how and when[J]. Journal of Thoracic Disease, 2017, 9(9):3319-3345.

[9]HAYNES J M, KAMINSKY D A, RUPPEL G L. The role of pulmonary function testing in the diagnosis and management of COPD[J]. Respiratory Care, 2023, 68(7):889-913.

[10]朱彦瑾，杨丹凤，牛媛，等. 基于双气相配准定量CT在无症状吸烟者肺小气道病变中的应用[J]. 中国医学影像学杂志，2022，30(1)：23-28.

[11]JIAO L, SHEN R, LI M, et al. Determination of pulmonary vessel alteration in Chinese male smokers by quantitative computed tomography measurements: A retrospective study[J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 2024, 14(5):3289-3301.

[12]KIRBY M, SMITH B M, TANABE N, et al. Computed tomography total airway count predicts progression to COPD in at-risk smokers[J]. ERJ Open Research, 2021, 7(4). DOI:10.1183/23120541.00307-2021.

[13]刘树芳，张若曦，王立强，等. 吸烟损伤肺小气道的高分辨率CT诊断价值[J]. 河北医药，2017，39(24)：3778-3780.

[14]HUANG X Q, PAN J, FANG Y Y, et al. Interaction of smoking and aging on emphysema and small airways disease in asymptomatic healthy men by CT-based parametric response mapping analysis[J]. Clinical Radiology, 2024, 79(1):e156-e163.

[15]BYON J H, JIN G Y, HAN Y M, et al. Quantitative CT analysis based on smoking habits and chronic obstructive pulmonary disease in patients with normal chest CT[J]. Journal of the Korean Society of Radiology, 2023, 84(4):900-910.

[16]CHEN B, GAO P, YANG Y L, et al. Discordant definitions of small airway dysfunction between spirometry and parametric response mapping: The HRCT-based study[J].

Insights into Imaging,2024,15(1):233.

[17]POMPE E, GALBÁN C J, ROSS B D, et al. Parametric response mapping on chest computed tomography associates with clinical and functional parameters in chronic obstructive pulmonary disease[J]. Respiratory Medicine, 2017,123:48-55.

[18]BHATT S P, SOLER X, WANG X, et al. Association between functional small airway disease and FEV1 decline in chronic obstructive pulmonary disease[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2016, 194(2):178-184.

[19]GALBÁN C J, HAN M K, BOES J L, et al. Computed tomography-based biomarker provides unique signature for diagnosis of COPD phenotypes and disease progression[J]. Nature Medicine,2012,18(11):1711-1715.

[20]VASILESCU D M, MARTINEZ F J, MARCHETTI N, et al. Noninvasive imaging biomarker identifies small airway damage in severe chronic obstructive pulmonary disease[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine,2019,200(5):575-581.

[21]VERLEDEN S E, HENDRIKS J M H, SNOECKX A, et al. Small airway disease in pre-chronic obstructive pulmonary disease with emphysema: A cross-sectional study[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine,2024,209(6):683-692.

[22]ABU HASSAN H, ABD AZIZ N, HASSAN Y, et al. Does the duration of smoking cessation have an impact on hospital admission and health-related quality of life amongst COPD patients?[J]. International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease,2014,9:493-498.

[23]陈典,隆寰宇,张丛溪,等. 2025 年 GOLD 慢性阻塞性肺疾病诊断、治疗、管理及预防全球策略更新要点解读[J]. 中国全科医学,2025,28(16):1937-1949.

[收稿日期　2025-06-05;责任编辑　梁　毅]

(上接第 63 页)

[7]GUAN Y, ZHOU X X, ZHANG D, et al. The characteristics of emphysema and pulmonary perfusion derived from spectral CT in smokers[J]. Journal of Thoracic Disease, 2023,15(11):6084-6093.

[8]王雷,赵凡惠,李建龙,等. 基于 CT 双气相扫描对 COPD 患者肺容积定量研究[J]. 中国临床医学影像杂志,2019, 30(9):617-620.

[9]LIN C R, BAHMED K, KOSMIDER B. Dysregulated cell signaling in pulmonary emphysema[J]. Frontiers in Medicine, 2022,8:762878.

[10]PU Y, ZHOU X X, ZHANG D, et al. Quantitative assessment characteristics of small pulmonary vessel remodelling in populations at high risk for COPD and smokers using low-dose CT[J]. International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease,2024,19:51-62.

[11]BHATTARAI P, LU W Y, GAIKWAD A V, et al. Arterial remodelling in smokers and in patients with small airway disease and COPD: Implications for lung physiology and early origins of pulmonary hypertension[J]. ERJ Open Research, 2022, 8(4). DOI: 10.1183/23120541.00254-2022.

[12]UEJIMA I, MATSUOKA S, YAMASHIRO T, et al. Quantitative computed tomographic measurement of a cross-sectional area of a small pulmonary vessel in nonsmokers without airflow limitation[J]. Japanese Journal of Radiology,2011,29(4):251-255.

[13]GREFFIER J, VILLANI N, DEFEZ D, et al. Spectral CT imaging: Technical principles of dual-energy CT and multi-energy photon-counting CT[J]. Diagnostic and Interventional Imaging,2023,104(4):167-177.

[14]STEINHARDT M, MARKA A W, ZIEGELMAYER S, et al. Comparison of virtual non-contrast and true non-contrast CT images obtained by dual-layer spectral CT in COPD patients[J]. Bioengineering,2024,11(4):301.

[15]ANDERSEN M B, EBBESEN D, THYGESEN J, et al. Economic impact of spectral body imaging in diagnosis of patients suspected for occult cancer[J]. Insights into Imaging,2021,12(1):190.

[16]ELBEHAIRY A F, VINCENT S G, PHILLIPS D B, et al. Pulmonary vascular volume by quantitative CT in dyspneic smokers with minor emphysema[J]. COPD,2023,20(1): 135-143.

[17]LEE H J, WANDERLEY M, DA SILVA RUBIN V C, et al. Lobar pulmonary perfusion quantification with dual-energy CT angiography: Interlobar variability and relationship with regional clot burden in pulmonary embolism[J]. European Journal of Radiology Open,2022,9:100428.

[收稿日期　2025-09-19;责任编辑　梁　毅]