

早期肺小气道损害能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC 的相关性

高翔, 杨程

(南京明基医院放射科, 江苏南京 210019)

[摘要] **目的** 探讨肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与肺通气功能参数的关系。**方法** 回顾性分析 2021 年 8 月至 2024 年 12 月南京明基医院收治的 152 例早期肺小气道损害患者临床资料, 作为观察组; 另收集同期在医院健康体检者 152 例临床资料, 作为对照组。所有受检者资料均完整, 包括能谱 CT 检查资料、肺功能检查资料及一般资料。比较两组的能谱 CT 检查参数及肺功能参数, 分析能谱 CT 碘基值筛查早期肺小气道损害的价值, 并分析肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与第 1 秒用力呼气容积(forced expiratory volume in one second, FEV1)/用力肺活量(forced vital capacity, FVC)的相关性。**结果** 观察组 FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 均比对照组低($P < 0.05$); 观察组能谱 CT 的动脉期标准化碘基值(normalized iodine concentration in arterial phase, nICAP)、静脉期标准化碘基值(normalized iodine concentration in venous phase, nICVP)值均比对照组低($P < 0.05$); 经 Logistic 回归分析发现, FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75%、nICAP、nICVP 升高均是早期肺小气道损害的保护因子($OR < 1$, $P < 0.05$); ROC 曲线结果显示, 能谱 CT nICAP、nICVP 值及 FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 筛查早期肺小气道损害的 AUC 均 >0.50 , 且联合筛查早期肺小气道损害的 AUC >0.90 , 筛查价值较高; 采用双变量 Pearson 直线相关性分析结果显示, 早期肺小气道损害患者 FEV1/FVC 与 nICAP、nICVP 之间无相关性($r = 0.096$ 、 0.076 , $P = 0.098$ 、 0.189), 与 FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 之间呈正相关($P < 0.05$)。**结论** 能谱 CT 碘基值与肺小气道损害存在相关性, 而早期肺小气道损害患者的能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC 之间无相关性。

[关键词] 肺小气道损害; 能谱 CT; 碘基值; 第 1 秒用力呼气容积; 用力肺活量; 相关性

[中图分类号] R563.9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2095-610X(2026)06-0134-07

Correlation between Energy Spectrum CT Iodine-based Values and FEV1/FVC in Early-stage Small Airway Damage of the Lung

GAO Xiang, YANG Cheng

(Department of Radiology, Nanjing Mingji Hospital, Nanjing Jiangsu 210019, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the relationship between spectral computed tomography (CT) iodine-based values and pulmonary ventilation function parameters in patients with early-stage pulmonary small airway dysfunction. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 152 patients with early-stage pulmonary small airway dysfunction admitted to Nanjing Mingji Hospital from August 2021 to December 2024, designated as the observation group. Additionally, 152 cases of clinical data from healthy individuals who underwent physical examination at the hospital during the same period were collected as the control group. All subjects had complete data including spectral CT imaging data, pulmonary function test data, and general information. Spectral CT parameters and pulmonary function parameters between the two groups were compared. The value of spectral CT iodine-based values in screening for early-stage pulmonary small airway dysfunction was analyzed, and the

[收稿日期] 2025-10-21

[基金项目] 南京市卫生局指导性科研计划课题(2022112684)

[作者简介] 高翔(1990~), 男, 江苏南京人, 医学学士, 主管技师, 主要从事影像诊断工作。

[通信作者] 杨程, E-mail: 907650445@qq.com

correlation between spectral CT iodine-based values and forced expiratory volume in one second (FEV1)/forced vital capacity (FVC) in patients with pulmonary small airway dysfunction was examined. **Results** FEV1/FVC, FEF50%, FEF75%, and FEF25% ~ 75% in the observation group were significantly lower than those in the control group ($P < 0.05$). Normalized iodine concentration in arterial phase (nICAP) and normalized iodine concentration in venous phase (nICVP) values on spectral CT in the observation group were significantly lower than those in the control group ($P < 0.05$). Logistic regression analysis revealed that increases in FEV1/FVC, FEF50%, FEF75%, FEF25% ~ 75%, nICAP, and nICVP were all protective factors against early-stage pulmonary small airway dysfunction ($OR < 1$, $P < 0.05$). ROC curve analysis demonstrated that the area under the curve (AUC) for spectral CT nICAP and nICVP values and FEV1/FVC, FEF50%, FEF75%, FEF25% ~ 75% in screening for early-stage pulmonary small airway dysfunction were all greater than 0.50, with combined screening achieving an AUC greater than 0.90, indicating high screening value. Bivariate Pearson linear correlation analysis showed no correlation between FEV1/FVC and nICAP and nICVP in patients with early-stage pulmonary small airway dysfunction ($r = 0.096, 0.076$; $P = 0.098, 0.189$), while positive correlations were found with FEF50%, FEF75%, and FEF25% ~ 75% ($P < 0.05$). **Conclusion** Spectral CT iodine-based values are correlated with pulmonary small airway dysfunction; however, no correlation exists between spectral CT iodine-based values and FEV1/FVC in patients with early-stage pulmonary small airway dysfunction.

[**Key words**] Pulmonary small airway damage; Spectral CT; Iodine basis value; First second forced expiratory volume; Forced lung capacity; Correlation

肺小气道损害为重要呼吸系统疾病, 其高发人群包括慢性支气管炎患者、支气管哮喘患者、慢性阻塞性肺疾病患者以及长期烟草暴露者, 据报道, 肺小气道结构或功能异常的检出率为1%~4%, 这类病变通过引发小气道气流受限, 可导致肺通气功能障碍进行性加重, 从而影响患者的生活质量^[1-2]。研究指出, 早期肺小气道损害可能是由黏液栓塞、炎症引起, 此时经系统性治疗可实现病理逆转, 若未及时干预则可出现纤维化、变形、狭窄甚至闭合, 最终诱发呼吸衰竭、肺源性心脏病^[3]。由此可见, 早期识别肺小气道损伤对临床诊疗具有重要意义。目前, 临床对于肺小气道损害主要通过肺功能检查, 然而受限于患者配合度、基础疾病状态等影响因素, 该检测方法的敏感性和可重复性存在明显不足, 且肺功能检查仅能反映全肺通气与气体交换功能的整体状态, 无法提供气道微观结构变化的形态学依据, 在临床应用中具有技术局限性^[4]。能谱CT技术通过获取多能量水平的定量化参数, 其碘基图可精确量化组织器官的碘摄取水平, 直观呈现病变区域或正常组织的血流灌注特征分布, 进而实现对肺组织微循环状态的定量评估^[5]。有研究使用能谱CT碘基值有效评估肺部疾病危险程度^[6], 但关于其对于早期肺小气道损害的筛查价值还需进一步证实。基于此, 本研究将重点观察能谱CT碘基值筛查肺小气道损害的价值及其与第1秒用力呼气容积(forced expiratory volume in one second,

FEV1)/用力肺活量(forced vital capacity, FVC)相关性, 以为肺小气道损害的临床筛查提供参考依据, 提高患者的临床获益水平。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究为回顾性分析, 收集2021年8月至2024年12月南京明基医院收治的152例早期肺小气道损害患者临床资料, 作为观察组; 另选取同期在医院健康体检者152例临床资料, 作为对照组。纳入标准: (1)符合早期小气道功能损害诊断标准^[7], 50%肺活量时用力呼气流速(forced expiratory flow at 50% of FVC exhaled, FEF50%)、75%肺活量时用力呼气流速(forced expiratory flow at 75% of FVC exhaled, FEF75%)、用力呼气中期流量(FEF25%~75%)中任意两个指标<65%; (2)均接受肺功能检查、能谱CT检查; (3)资料完整, 具有完整影像学检查资料与一般资料; (4)年龄≥18岁。排除标准: (1)存在严重心脑血管疾病者; (2)具有肺部手术史; (3)存在支气管扩张、胸腔积液、胸廓畸形及气胸者; (4)合并先天性心脏病者; (5)合并传染性疾病者。本研究经南京明基医院伦理委员会批准(2026-KL007)。

1.2 研究方法

1.2.1 肺功能检查 采用德国Jaeger公司Master Screen PFT型肺功能检测系统, 受检者安静10

min, 采取标准坐姿, 要求受检者进行 3 次平稳的潮式呼吸作为基线校准, 继而以最大努力完成快速深吸气动作, 随后立即转为爆发性、连续性且完整的用力呼气过程, 最大限度通过接口装置完成呼吸, 整个呼吸周期中严格避免自主性中断或咳嗽反射干扰; 指导受检者尽最大努力、快速深吸气, 重复测试 3 次, 每次曲线尽量重合为合格肺功能。测定的肺功能指标包括: FEF50%、FVC、FEF75%、FEV1、FEF25%~75%、FEV1/FVC。

1.2.2 能谱 CT 检查 采用 GE Revolution Apex Expert 256 排 512 层量子 CT, 受检者取仰卧位(双臂上举过头, 头先进体位), 通过呼吸指令训练使其掌握呼气末屏气技术, 扫描参数: 管电压在 80 kVp 与 140 kVp 间瞬时切换(切换周期 0.5 ms), 机架旋转时间为 0.5 s, 层厚 1 mm, 探测准直器 256×0.625 mm, 管电流 200 mAs, 螺距 0.915:1; 先平扫, 成像野从胸廓入口至膈顶水平, 全面覆盖肺实质区域, 随后经肘前静脉以 5 mL/s 流率团注 15 mL 碘帕醇对比剂, 采取动脉测试分析软件确定肺动脉强化峰值时间, 后实施全肺灌注扫描, 在对比剂主团注射(50 mL, 流率 5 mL/s)后, 根据峰值时相延迟触发动脉期与静脉期双期扫描, 扫描范围与平扫保持一致。将扫描图像传至工作站进行后处理, 通过选取对比剂首次通过肺循环阶段及肺实质强化达峰时相进行图像分析, 采用同侧或对侧正常肺组织为对照, 综合常规肺窗影像特征评估肺部血流灌注状态。沿重力方向将肺组织等分为 3 个冠状层面(仰卧状态), 将双肺分为上、中、下三区, 水平方向分为外、中、内三带, 在每个层面的各个分区内系统选取 3 个测量点进行均匀采样, 建立 100 mm^2 感兴趣区(region of interest, ROI), 以同层面主动脉 ROI 为参照, 测量时规避血管结构和肺气肿区域, 测量碘基值, 并将测量值除以主动脉碘基值进行标准化, 得到标准化碘基值, 包括静脉期标准化碘基值(normalized iodine concentration in venous phase, nICVP)、动脉期标准化碘基值(normalized iodine concentration in arterial phase, nICAP)。

1.2.3 观测指标 比较观察组与对照组患者的肺功能指标(FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75%)、能谱 CT 碘基值(nICAP、nICVP), 分析各指标与早期肺小气道损害关系; 分析能谱 CT 碘基值、FEV1/FVC 筛查早期肺小气道损害价值; 并分析早期肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 的相关性。

1.2.4 检查时间与同步性设计 所有受试者均在同一天上午完成肺功能测试及能谱 CT 检查, 两次检查间隔控制在 1 h 内; 先进行肺功能测试, 完成肺功能检查后立即进行能谱 CT 检查, 确保肺部处于相似通气状态下采集影像数据。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件, 计量资料正态性经 Shapiro-Wilk 检验, 符合正态分布的计量资料(年龄、FEV1/FVC 等)采用均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 采用 *t* 检验; 计数资料(性别)以 % 和 *n* 表示, 采用 χ^2 检验; 采用 Logistic 回归分析检验各指标与早期肺小气道损害关系; 绘制受试者工作曲线(receiver operating curve, ROC), 检验能谱 CT 碘基值、FEV1/FVC 筛查早期肺小气道损害的价值, 以曲线下面积(area under the curve, AUC)评价; 相关性分析采用双变量 Pearson 直线相关性检验; 检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 一般资料

两组一般资料比较, 差异无统计学意义($P>0.05$), 具有可比性, 见表 1。

2.2 典型病例

患者 1, 女, 52 岁, 因发热前来就诊, 既往病史左乳腺癌术后, 通过能谱增强 CT 提示右肺下叶炎症, 小气道损伤及多段骨转移, 见图 1A~1B。

患者 2, 女, 62 岁, 因胸闷前来就诊, 能谱增强 CT 提示两肺小气道病变。见图 1C~1D。

2.3 两组肺功能指标比较

观察组 FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 均比对照组低($P<0.05$), 见表 2。

2.4 两组能谱 CT 碘基值比较

观察组能谱 CT 的 nICAP、nICVP 值均比对照组低($P<0.05$), 见表 3。

2.5 各指标与早期肺小气道损害关系的 Logistic 回归分析

将早期肺小气道损害作为因变量(1=有, 0=无), 将患者基线资料比较、肺功能比较、能谱 CT 碘基值中有统计学差异的变量作为自变量(FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75%、nICAP、nICVP, 均为连续变量), 经 Logistic 回归分析发现, FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25%~75%、nICAP、nICVP 升高均是早期肺小气道损害的保护因子($OR<1$, $P<0.05$), 见表 4。

表 1 两组一般资料比较 [n(%)/($\bar{x} \pm s$)]

Tab. 1 Comparison of general information between two groups [n(%)/($\bar{x} \pm s$)]

组别	性别		年龄(岁)	体重指数(kg/m ²)	合并高血压	合并糖尿病
	男	女				
对照组(<i>n</i> = 152)	78(51.32)	74(48.68)	48.10 ± 6.39	23.20 ± 1.74	25(16.45)	17(11.18)
观察组(<i>n</i> = 152)	80(52.63)	72(47.37)	47.86 ± 6.12	23.12 ± 1.88	23(15.13)	15(9.87)
χ^2/t	0.053		0.334	0.385	0.099	0.140
<i>P</i>	0.818		0.738	0.701	0.753	0.709

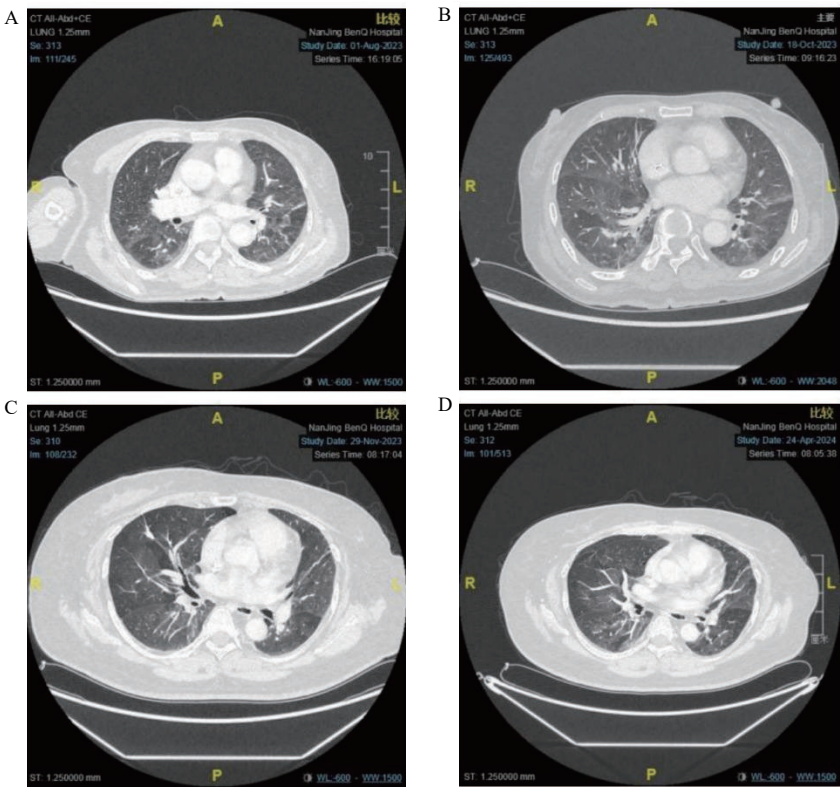


图 1 肺小气道损伤能谱 CT 图

Fig. 1 Energy spectrum CT image of pulmonary small airway injury

A ~ B: 患者 1 能谱 CT 检查图; C ~ D: 患者 2 能谱 CT 检查图。

表 2 两组 FEV1/FVC、FEF50%、FEF75%、FEF25% ~ 75% 比较($\bar{x} \pm s$)

Tab. 2 Comparison of FEV1/FVC, FEF50%, FEF75%, and FEF25% ~ 75% between two groups($\bar{x} \pm s$)

组别	<i>n</i>	FEV1/FVC(%)	FEF50%	FEF75%	FEF25% ~ 75%
对照组	152	75.35 ± 4.73	92.13 ± 8.57	89.73 ± 7.29	91.35 ± 6.64
观察组	152	73.88 ± 4.69	54.35 ± 5.20	42.38 ± 6.71	49.73 ± 5.54
<i>t</i>		2.721	46.466	58.919	58.337
<i>P</i>		0.007*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

**P* < 0.05。

2.6 能谱 CT 碘基值、肺功能指标筛查早期肺小气道损害价值

将早期肺小气道损害作为状态变量(1=有,

0=无), 将能谱 CT 碘基值、肺通气功能参数作为检验变量, 绘制 ROC 曲线见图 2, 结果显示, 能谱 CT nICAP、nICVP 值及 FEV1/FVC、FEF50%、

FEF75%、FEF25%~75% 筛查早期肺小气道损害的 AUC 均>0.50, 且联合筛查早期肺小气道损害的 AUC>0.90, 筛查价值较高, 见表 5。

表 3 两组 nICAP、nICVP 值比较 ($\bar{x} \pm s$)
Tab. 3 Comparison of nICAP and nICVP values between two groups ($\bar{x} \pm s$)

组别	n	nICAP	nICVP
对照组	152	0.95 ± 0.32	0.39 ± 0.10
观察组	152	0.65 ± 0.31	0.31 ± 0.11
t		8.302	6.635
P		<0.001*	<0.001*

*P < 0.05。

表 4 各指标与早期肺小气道损害关系的 Logistic 回归分析
Tab. 4 Logistic regression analysis of the relationship between each index and early pulmonary small airway damage

项目	B	S.E.	Wald χ^2	P	OR	95%CI
常量	-83.435	21.607	14.911	<0.001*	—	—
FEV1/FVC	-0.094	0.047	3.946	0.047*	0.910	0.829 ~ 0.999
FEF50%	-0.303	0.075	16.344	<0.001*	0.739	0.638 ~ 0.856
FEF75%	-0.289	0.079	13.273	<0.001*	0.749	0.641 ~ 0.875
FEF25% ~ 75%	-0.345	0.077	20.324	<0.001*	0.708	0.609 ~ 0.823
nICAP	-3.046	0.631	23.312	<0.001*	0.048	0.014 ~ 0.164
nICVP	-8.197	1.912	18.380	<0.001*	0.001	0.000 ~ 0.012

*P < 0.05。

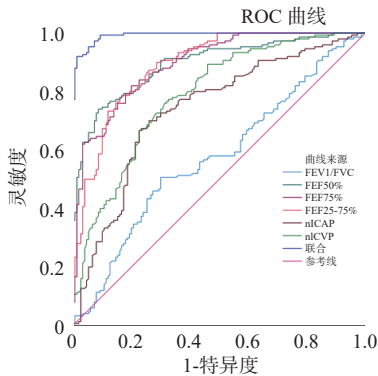


图 2 能谱 CT 碘基值、肺功能指标筛查早期肺小气道损害价值 ROC 图

Fig. 2 ROC plot of the value of energy spectrum CT iodine baseline and lung function indicators in screening early pulmonary small airway damage

3 讨论

小气道是指<2 mm 的气道, 具有管腔纤细、数量多、阻力小的特点, 小气道损害主要因吸烟、感染、过敏及职业因素引起, 早期小气道损害经积极治疗可获得满意的临床疗效, 而随着病情加重会增加临床治疗难度, 不利于患者的预后^[8-9]。

2.7 早期肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC 的相关性

采用双变量 Pearson 直线相关性分析结果显示, 早期肺小气道损害患者 FEV1/FVC 与 nICAP、nICVP 之间无相关性($r = 0.096$ 、 0.076 , $P = 0.098$ 、 0.189)。相关性散点图见图 3。

2.8 早期肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与 FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 的相关性

采用双变量 Pearson 直线相关性分析结果显示, 早期肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与 FEF50%、FEF75%、FEF25%~75% 之间呈正相关($P < 0.05$), 见表 6。相关性散点图见图 4。

且有研究指出, 早期筛查与治疗是改善小气道损害患者预后的关键^[10]。目前, 肺通气功能检测作为评估小气道损伤的首选筛查方法, 主要通过分析 FEF50%、FEF75% 及 FEF25%~75% 等参数的功能性变化来判断病变程度, 几乎不受患者用力程度影响, 真实可靠, 但需两项同时低于 65% 预计值才具备筛查意义, 可能会导致部分患者漏诊, 临床应用存在一定的局限性^[11-12]。

FEV1 是最大深吸气后进行最大呼气, 第 1 秒呼出气体的容积, 而 FEV1/FVC 为判定慢性阻塞性肺疾病与哮喘的常用指标^[13]。本研究发现, 观察组的 FEV1/FVC 比对照组低, 说明随着 FEV1/FVC 降低会增加早期肺小气道损伤风险。在赵凡惠等^[14]研究中发现, 小气道病变程度与患者的 FEV1/FVC 存在相关性。与本研究结果较为相似。FEV1/FVC 虽能通过评估肺通气与换气功能辅助早期小气道损害的筛查, 但其检测过程对患者依从性要求较高, 且无法直观呈现组织结构改变, 部分患者临床表现轻微却存在的肺实质损伤与小气道重构, 有些患者症状严重, 但病理变化并不明显, 缺乏特异性, 还需开展其他检查来明确病因^[15-16]。

肺小气道损害患者早期普遍存在微循环功能紊乱与肺泡-毛细血管膜通透性改变, 引发造影

表 5 能谱 CT 碘基值、肺功能指标筛查早期肺小气道损害价值分析结果

Tab. 5 Value of energy spectrum CT iodine baseline values and lung function indicators in screening early pulmonary small airway damage

变量	AUC	AUC 95%CI	cut-off值	P	特异度	灵敏度	约登指数
FEV1/FVC	0.574	0.509 ~ 0.639	74.635	0.026*	0.580	0.520	0.100
FEF50%	0.894	0.858 ~ 0.930	86.000	<0.001*	0.853	0.773	0.626
FEF75%	0.895	0.861 ~ 0.930	82.945	<0.001*	0.800	0.800	0.600
FEF25% ~ 75%	0.891	0.855 ~ 0.926	85.595	<0.001*	0.803	0.800	0.603
nICAP	0.737	0.680 ~ 0.794	0.812	<0.001*	0.740	0.700	0.440
nICVP	0.787	0.737 ~ 0.838	0.323	<0.001*	0.700	0.740	0.440
联合	0.993	0.987 ~ 0.998	—	<0.001*	0.827	0.993	0.820

*P < 0.05。

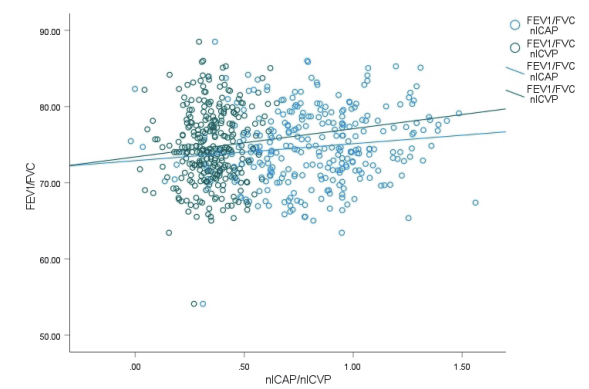


图 3 早期肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC 的相关性散点图

Fig. 3 Scatter plot of the correlation between iodide values of spectral CT and FEV1/FVC in patients with early pulmonary small airway damage

表 6 相关性分析结果

Tab. 6 Correlation analysis results

指标	nICAP		nICVP	
	r	P	r	P
FEF50%	0.293	<0.001*	0.445	<0.001*
FEF75%	0.309	<0.001*	0.442	<0.001*
FEF25% ~ 75%	0.330	<0.001*	0.479	<0.001*

*P < 0.05。

剂异常分布, 而能谱 CT 作为功能性影像学手段, 其碘基物质分析可量化肺组织内对比剂蓄积程度, 既能通过灌注参数间接评估血流动力学状态, 又能直接测定病灶区碘含量, 为小气道损害提供客观依据^[17]。本研究发现, 观察组能谱 CT 的 nICAP、nICVP 值均比对照组低, 说明随着能谱 CT 的 nICAP、nICVP 值降低, 会提高早期肺小气道损害风险, 可能因为早期肺小气道损害伴随炎症反应, 血管内皮细胞间隙增大, 导致碘对比剂从血管向间质外渗, 而能谱 CT 通过碘-水双物质分解算法, 排除钙化干扰, 准确量化非钙化成分的碘分布特征^[18-19]。在 Tang 等^[20] 研究中证实, 碘基值与体外标准碘浓度存在高度一致性, 误差<

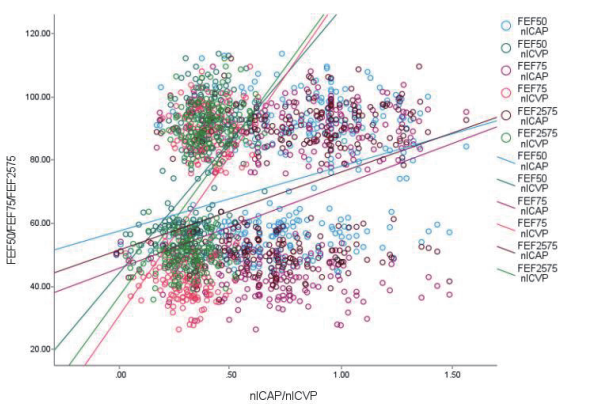


图 4 早期肺小气道损害患者能谱 CT 碘基值与 FEF50%、FEF75%、FEF25% ~ 75% 的相关性散点图

Fig. 4 Scatter plot of the correlation between energy spectrum CT iodine baseline values and FEF50%, FEF75%, and FEF25% ~ 75% in patients with early pulmonary small airway damage

5%, 碘基值可客观、真实反映组织血流灌注情况。能谱 CT 测量 nICAP 值降低反映病变区血流灌注减少, nICVP 降低则体现延迟强化, 提示小气道周围循环障碍和淋巴回流受阻, 从而来判断早期肺小气道损害情况^[21]。且本研究经回归分析及 ROC 曲线分析发现, nICAP、nICVP 水平升高均是早期肺小气道损害的保护因子, 能谱 CT nICAP、nICVP 值筛查早期肺小气道损害的 AUC 均>0.70, 筛查价值较为理想, 证实了能谱 CT 碘基值对于早期肺小气道损害的筛查价值。此外, 本研究还对早期肺小气道损害患者的能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC 之间进行相关性分析, 结果显示, 早期肺小气道损害患者 FEV1/FVC 与 nICAP、nICVP 之间无相关性, 可能是因为 FEV1/FVC 主要反映大气道阻塞程度, 而小气道损害对气流阻力贡献仅占 20% ~ 30%, 难以全面评价小气道损害情况, 同时 FEV1/FVC 为静态肺功能指标, 能谱 CT 碘基值动态增强需精确匹配呼吸周期, 二者时间维度不匹配, 故二者之间无相关性^[22-23]。

本研究存在一定的局限性:(1)研究对象年龄集中于70岁以下人群,存在选择偏倚,可能低估老年人群的病变特征;(2)回顾性设计固有的混杂因素干扰,可能影响因果推断。后续研究将通过前瞻性队列设计扩大样本年龄范围,并采用多中心数据校正混杂因素,以验证碘基值在早期筛查中的普适性,最终实现精准诊疗和患者获益最大化,为肺小气道损害的诊断提供参考依据,或可促进患者良好预后。

综上所述,能谱 CT 碘基值与肺小气道损害存在相关性,而早期肺小气道损害患者的能谱 CT 碘基值与 FEV1/FVC 之间无相关性。

[参考文献]

- [1] 黄晓旗,牛媛,雷禹,等.基于 CT 双气相定量研究吸烟合并慢性阻塞性肺疾病患者的肺叶小气道病变及肺气肿损伤程度[J].*中华放射学杂志*, 2022, 56(5): 536-541.
- [2] Qu Y, Wang L, Liu J. Evaluating the clinical utility of small airway function assessment for early diagnosis of GOLD stage 0 chronic obstructive pulmonary disease[J]. *J Asthma*, 2024, 61(11): 1554-1560.
- [3] Zhang D, Guan Y, Zhou X, et al. Aerodynamic simulation of small airway resistance: A new imaging biomarker for chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 2024, 19: 1167-1175.
- [4] 蒋萍影,唐国英.外周血 EETs 水平与咳嗽变异性哮喘患儿 Th1 和 Th2 及其细胞因子、小气道功能的相关性分析[J].*中国妇幼健康研究*, 2024, 35(2): 38-43.
- [5] 陈宏志,朱林,郭飞.能谱 CT 低灌注在急性肺动脉栓塞风险分层中的应用[J].*蚌埠医学院学报*, 2024, 49(1): 103-105+109.
- [6] 朱林,卢冉,郭飞.能谱 CT 全肺平均灌注碘基值对急性肺动脉栓塞危险分层的效果评估[J].*国际医学放射学杂志*, 2022, 45(5): 503-507.
- [7] Ling K M, Garratt L W, Banerjee B, et al. Azithromycin partially mitigates dysregulated repair of lung allograft small airway epithelium[J]. *Transplantation*, 2020, 104(6): 1166-1176.
- [8] Xu W J, Shang W Y, Feng J M, et al. Machine learning for accurate detection of small airway dysfunction-related respiratory changes: An observational study[J]. *Respir Res*, 2024, 25(1): 286.
- [9] 孙天生,宋慧慧,唐昊.小气道功能在支气管哮喘中的研究进展[J].*临床肺科杂志*, 2024, 29(5): 754-758.
- [10] Bai H, Shi C, Yu S, et al. A comparative study on the value of lower airway exhaled nitric oxide combined with small airway parameters for diagnosing cough-variant asthma[J]. *Ther Adv Respir Dis*, 2023, 17: 17534666231181259.
- [11] 牛媛,雷禹,沈敏,等.基于双气相配定量 CT 评估 COPD 患者小气道病变[J].*放射学实践*, 2022, 37(12): 1516-1522.
- [12] 解宝珠,丁琦,李华,等.慢性阻塞性肺疾病小气道病变检测技术的研究进展[J].*医学综述*, 2023, 29(4): 730-736.
- [13] Lu L, Wu F, Tang G, et al. Associations of small airway dysfunction assessed by impulse oscillometry with lung function decline and exacerbations in participants with chronic obstructive pulmonary disease: A prospective cohort study in China[J]. *Respir Med*, 2025, 241: 108075.
- [14] 赵凡惠,王雷,朱彦瑾,等.基于双气相定量 CT 评估 COPD 患者小气道病变和肺气肿程度的研究[J].*临床放射学杂志*, 2019, 38(12): 2307-2312.
- [15] 刘霞,郭丹丹,李春平,等. HRCT 肺小血管管面积定量测量与 COPD 小气道功能的相关性研究[J].*医学影像学杂志*, 2022, 32(2): 240-245.
- [16] 崔可慧,苏新明.呼出气一氧化氮检测与稳定期慢性阻塞性肺疾病患者小气道改变及预后的相关性[J].*中国医科大学学报*, 2023, 52(1): 12-17.
- [17] Meng X W, Pi Y W, Wang G L, et al. The relationship between quantitative parameters of dual-energy CT and HIF-1 α expression in non-small cell lung cancer[J]. *Curr Med Imaging*, 2024, 20: e15734056271811.
- [18] 赵岩,汤林花,徐润桃,等.急性肺栓塞双能量能谱 CT 碘基物质图联合肺灌注缺损指数的运用价值[J].*医学影像学杂志*, 2023, 33(9): 1581-1584.
- [19] 贾艳荣,张凤翔,张芳,等.能谱 CT 联合 MRI-DWI 在鉴别肺炎性结节与肺癌中的价值[J].*医学影像学杂志*, 2024, 34(11): 57-61.
- [20] Alomari M, Wadiwala I, Bowers S, et al. Oxygen saturation endoscopic imaging as a novel alternative to assess tissue perfusion during esophagectomy[J]. *Surg Innov*, 2024, 31(6): 622-626.
- [21] 肖慧娟,刘谊和,梁盼,等. Revolution 256 CT 低剂量能谱碘水基物质对及三段能谱曲线斜率法定量鉴别不同周围型肺癌[J].*医学影像学杂志*, 2024, 34(4): 28-32.
- [22] Jiang D, Qin L, Pan W, et al. The value of high-pitch scanning with Sn100kV and ADMIRE in CT examination of tuberculous destroyed lung: Identifying the optimal combination for ultra-low-dose imaging[J]. *PLoS One*, 2025, 20(5): e0322374.
- [23] Bodenberger A L, Konietzke P, Weinheimer O, 等.气道壁能谱 CT 单能虚拟对比增强的定量研究[J].*国际医学放射学杂志*, 2023, 46(5): 626.