

间质性肺病患者的脉冲振荡参数与通气和换气功能的相关性分析

张婷^{1▲} 王倩^{1▲} 龚颖² 李丽² 姚欢³ 陈智鸿^{4,5△}

¹上海市静安区闸北中心医院呼吸与危重症学科 上海 200070; ²复旦大学附属中山医院呼吸与危重症学科 上海 200032;

³张家港市第五人民医院呼吸与危重症学科 张家港 215600; ⁴上海交通大学医学院附属新华医院呼吸与危重症医学科

上海 200092; ⁵上海交通大学医学院呼吸病研究所 上海 200092)

【摘要】 目的 探讨脉冲振荡技术(impulse oscillometry, IOS)参数与间质性肺病(interstitial lung disease, ILD)患者通气及换气功能之间的相关性,评估 IOS 在 ILD 肺功能评估中的临床应用价值。方法 采用回顾性研究,纳入 2022 年 11 月至 2024 年 4 月经多学科团队确诊的 ILD 患者 119 例。所有患者均完成常规肺功能检查(通气和换气功能)及 IOS 检测。依据用力肺活量(forced vital capacity, FVC)占预计值百分比(FVC%pred)、肺一氧化碳弥散量(diffusing capacity of the lung for carbon monoxide, DLCO)占预计值百分比(DLCO%pred)分别对通气功能、换气功能进行分组,比较不同损害程度组间 IOS 参数的差异,并分析 IOS 参数与 FVC%pred、DLCO%pred 的相关性。结果 IOS 参数中,总呼吸阻抗(Z5、Z5%)、总气道阻力(R5、R5%)、外周气道阻力(R5-R20)、共振频率(Fres)及电抗面积(AX)均随通气功能损害程度加重而显著升高(P 均 <0.05),外周电抗(X5)负值增大($P<0.001$),组间中心气道阻力(R20)比较未见显著差异。换气功能方面,仅 X5、AX 与 DLCO%pred 存在有限关联($P<0.05$),其余 IOS 参数在不同 DLCO%pred 组间差异均无统计学意义。相关性分析显示,所有 IOS 参数与 FVC%pred 均显著相关(P 均 <0.05),其中 AX 的相关性最强($r_s=-0.462$);而与 DLCO%pred 的相关性普遍较弱($|r_s|<0.4$),其中 Z5%($r_s=-0.242$)、R5%($r_s=-0.189$)、R5-R20($r_s=-0.254$)、X5($r_s=0.313$)、Fres($r_s=-0.263$)及 AX($r_s=-0.358$)与 DLCO%pred 弱相关(P 均 <0.05)。临床症状与体征分析显示,有症状的 ILD 患者的 R5-R20 显著高于无症状组($P=0.013$),X5 负值更大($P=0.035$);阳性体征患者 X5 负值显著大于无体征组($P=0.010$)。ROC 曲线分析显示,AX 与 R5-R20 判别通气功能异常具有一定效能,AUC 分别为 0.7456 和 0.7265。结论 IOS 参数与 ILD 患者的通气功能损害程度密切相关,能敏感反映外周气道阻力及肺弹性变化,但在评估换气功能方面价值有限。IOS 可作为评估 ILD 患者肺通气功能的辅助工具,尤其适用于无法完成常规肺功能检查者,同时需结合换气功能等指标进行全面肺功能评估。

【关键词】 脉冲振荡技术(IOS); 间质性肺病(ILD); 通气功能; 换气功能

【中图分类号】 R563,R448 **【文献标志码】** A **doi:** 10.3969/j.issn.1672-8467.2026.05.008

Correlation analysis on impulse oscillometry parameters with ventilatory and gas exchange function in patients with interstitial lung disease

ZHANG Ting^{1▲}, WANG Qian^{1▲}, GONG Ying², LI Li², YAO Huan³, CHEN Zhi-hong^{4,5△}

(¹Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhabei Central Hospital of Jing'an District, Shanghai 200070, China; ²Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China; ³Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, the Fifth People's Hospital of

▲ZHANG Ting and WANG Qian contributed equally to this work

△Corresponding author E-mail: chenzhong@xinhua.com.cn

网络首发时间:2026-07-27 14:03:20 网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/31.1885.r.20260726.1046.002

Zhangjiagang City, Zhangjiagang 215600, Jiangsu Province, China; ⁴Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Xinhua Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China; ⁵Institute of Respiratory Diseases, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China)

【Abstract】 Objective To investigate the correlation between impulse oscillometry (IOS) parameters and ventilatory and gas exchange functions in patients with interstitial lung disease (ILD), and to evaluate the clinical application value of IOS in the assessment of pulmonary function in ILD. **Methods** This retrospective study enrolled 119 patients with ILD confirmed by a multidisciplinary team between Nov 2022 and Apr 2024. All patients completed conventional pulmonary function tests (including ventilatory and gas exchange functions) and IOS examinations. Patients were stratified into subgroups based on the percentage of predicted forced vital capacity (FVC%pred) for ventilatory function and the percentage of predicted diffusing capacity of the lung for carbon monoxide (DLCO%pred) for gas exchange function. Differences in IOS parameters among groups with varying degrees of functional impairment were compared, and the correlations between IOS parameters and FVC%pred as well as DLCO%pred were analyzed. **Results** Among the IOS parameters, total respiratory impedance (Z5, Z5%), total airway resistance (R5, R5%), peripheral airway resistance (R5–R20), resonant frequency (Fres), and reactance area (AX) all increased significantly with the severity of ventilatory impairment (all $P < 0.05$), while peripheral reactance (X5) became more negative ($P < 0.001$). Central airway resistance (R20) showed no significant difference in intergroup comparisons. Regarding gas exchange function, except for limited associations observed for X5 and AX with DLCO%pred ($P < 0.05$), the remaining IOS parameters showed no significant differences across the DLCO%pred subgroups. Correlation analysis showed that all IOS parameters were significantly correlated with FVC%pred (all $P < 0.05$), with AX showing the strongest correlation ($r_s = -0.462$). In contrast, their correlations with DLCO%pred were generally weaker ($|r_s| < 0.4$). Specifically, Z5% ($r_s = -0.242$), R5% ($r_s = -0.189$), R5–R20 ($r_s = -0.254$), X5 ($r_s = 0.313$), Fres ($r_s = -0.263$), and AX ($r_s = -0.358$) showed statistically significant but weak correlations with DLCO%pred (all $P < 0.05$). Analysis of clinical symptoms and signs showed that ILD patients with clinical symptoms had significantly higher R5–R20 than the asymptomatic group ($P = 0.013$), and more negative peripheral reactance (X5) values ($P = 0.035$). Patients with positive physical signs had significantly more negative X5 values than those without physical signs ($P = 0.010$). ROC curve analysis showed that AX and R5–R20 had moderate discriminative efficacy for identifying abnormal ventilatory function, with the AUC of 0.7456 and 0.7265, respectively. **Conclusion** IOS parameters are closely associated with the degree of ventilatory impairment in ILD patients, and are sensitive in reflecting changes in peripheral airway resistance and lung elasticity. However, their value in assessing gas exchange function is limited. IOS can serve as an effective auxiliary tool for evaluating ventilatory function in ILD patients, especially for those unable to cooperate with conventional pulmonary function tests. A comprehensive assessment should be performed by combining IOS with DLCO and other conventional indicators.

【Key words】 impulse oscillometry (IOS); interstitial lung disease (ILD); ventilatory function; gas exchange function

间质性肺病(interstitial lung disease, ILD)是以肺间质炎症和/或纤维化为特征的异质性疾病^[1-2],可导致限制性通气功能障碍和气体交换障碍,严重影响患者生存质量与预后^[3-4]。常规肺功能检查

(pulmonary function test, PFT)是评估ILD严重程度的核心手段^[5-6]。《2025年美国胸科学会/欧洲呼吸学会(American Thoracic Society/European Respiratory Society, ATS/ERS)指南》^[7]及《间质性

肺疾病多学科讨论规范中国专家共识》^[2]推荐将用力肺活量(forced vital capacity, FVC)占预计值的百分比(FVC%pred)和肺一氧化碳弥散量(diffusing capacity of the lung for carbon monoxide, DLCO)占预计值的百分比(DLCO%pred)分别评估通气和换气功能。常规PFT依赖患者用力呼气,部分老年、重症ILD患者难以规范完成^[8]。

脉冲振荡技术(impulse oscillometry, IOS)无需患者用力呼气,能客观反映气道阻力与肺弹性力学特征^[9]。研究证实IOS参数与常规PFT相关^[10],且与特发性肺纤维化(idiopathic pulmonary fibrosis, IPF)预后存在关联^[11],但尚未系统区分其在通气与换气功能评估中的差异。IOS主要反映肺弹性阻力,与限制性通气障碍有共同基础^[13];而换气功能主要取决于肺泡-毛细血管膜的弥散效率^[14],两者分属不同的病理生理范畴。目前尚缺乏基于上述差异的系统性关联研究。本研究拟分析IOS参数与FVC%pred、DLCO%pred的相关性,以明确IOS在ILD肺功能评估中的精准定位,为临床应用提供理论依据。

资料和方法

研究对象 选取2022年11月至2024年4月于复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科就诊的患者,经过病史与体征评估、胸部高分辨率CT(high resolution computed tomography, HRCT)、血清学自身抗体检测和/或活检等检查,并通过多学科团队依据《间质性肺疾病多学科讨论规范中国专家共识》^[2]确诊ILD。ILD主要亚型有结缔组织病相关性间质性肺病(connective tissue disease-associated interstitial lung disease, CTD-ILD)、IPF 16例(13.4%)和其他类型(包括不明原因ILD、感染后纤维化等)。所有受试者均自主完成常规PFT及IOS检测,检查由两名经验丰富的专职技师操作,严格遵循ATS/ERS标准^[15],且结果符合质量等级标准A级^[8-9]。通过电子病历系统收集患者的年龄、性别、BMI、ILD病程、临床症状(如低热、乏力、咳嗽、胸闷、胸痛、气短等)、阳性体征(如杵状指、技工手、Velcro啰音等)、用药史(如激素、免疫抑制剂、抗纤维化药物使用情况)及血清学标志物乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)、涎液化糖链抗原

KL-6水平。本研究通过复旦大学附属中山医院伦理委员会审批(批准号:B2021-850)。鉴于回顾性研究且仅使用去隐私化数据,伦理委员会批准豁免患者知情同意书。

纳入标准:(1)年龄 ≥ 18 岁;(2)符合共识^[2]诊断标准,经多学科团队确诊为以下任一ILD亚型,包括特发性ILD、CTD-ILD、职业和环境暴露相关性ILD、药物和治疗引起的ILD、肉芽肿性ILD、纤维化性ILD和无法分类的ILD;(3)意识清楚,能够理解并配合完成IOS和PFT检测。

排除标准:(1)合并其他可显著影响肺功能的肺部疾病,包括中重度慢性阻塞性肺疾病[支气管舒张剂用药后第1秒用力呼气量(forced expiratory volume in one second, FEV1)/FVC < 0.7 且FEV1占预计值的百分比(FEV1%pred) $< 80\%$]、需中高剂量吸入性糖皮质激素控制的哮喘、活动性肺结核、肺癌等;(2)严重的系统性疾病,包括纽约心脏病协会(New York Heart Association, NYHA)心功能分级Ⅲ~Ⅳ级、需药物或器械干预的严重心律失常、肾功能衰竭[估算肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate, eGFR) $< 30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 1.73 \text{ m}^{-2}$];(3)近4周内有明确记录的肺部感染或ILD急性加重;(4)气胸或近3个月内行胸腹部手术等影响肺功能检查准确性的情况;(5)吸烟或存在明确的、未经控制的环境/职业性有害因素暴露(如石棉、硅尘、煤尘等)。对于既往有吸烟史但已戒烟的患者,需记录吸烟指数,以排除吸烟对气道阻力的潜在影响。

肺功能检查 本研究采用德国耶格MasterScreen肺功能测试系统,操作严格遵循ATS/ERS标准^[15]。为避免用力呼气对气道张力可能产生的影响,患者先行IOS检测,休息5~10 min后再行常规PFT检测。

IOS检测 患者坐位,夹鼻夹,口含咬口器,双手轻压脸颊以减少颊部振动,在平静潮式呼吸下测量,频率范围5~35 Hz,测量至少持续45 s。每位患者重复测量3次,取重复性最佳结果的平均值。

评估参数包括^[9]:(1)Z5为呼吸总阻抗(5 Hz时呼吸阻抗);(2)Z5%为Z5实测值占预计值的百分比,Z5% $> 150\%$ 表示Z5增加^[16];(3)R5为气道总阻力(5 Hz时气道阻力);(4)R5%为R5实测值占预计值的百分比,R5% $> 150\%$ 表示R5增加^[16];(5)R20

为中心气道阻力(20 Hz时气道阻力);(6)R5-R20为外周气道阻力,即频率依赖性阻力,反映周边小气道功能^[17];(7)X5为外周电抗(5 Hz时电抗值),主要反映外周气道及肺组织的弹性回缩力,肺纤维化导致顺应性下降,X5负值增大,外周气道弹性阻力增大^[9];(8)共振频率(Fres)表示电抗为0时的频率(即惯性阻力和弹性阻力的方向相反,当两者大小相等时互相抵消),健康人一般为8~12 Hz,Fres增高反映周围气道病变和肺顺应性下降^[18];(9)AX为电抗面积(5 Hz至Fres频率区间内的总电抗),综合反映肺弹性阻力和周围气道阻力^[19]。

PFT检测 (1)肺容量和通气功能:患者在进行数次平静潮式呼吸后,以最大深吸气至肺总量位(total lung capacity, TLC),随后以最大力量、最快速度一次性呼气至残气位(reserve volume, RV)。每人至少完成3次符合质控标准的操作,取最佳值进行分析。测定参数包括FVC、FVC%pred、FEV1、FEV1%pred、TLC、TLC占预计值的百分比(TLC%pred)。(2)换气功能:采用DLCO和DLCO%pred。

分级和分组

通气功能分级 参照《成人肺功能诊断规范中国专家共识》^[8],通气功能分级采用FEV1%pred,ATS/ERS等国际权威指南^[15,20]推荐基于占预计值百分比进行分级的核心原则同样适用于FVC%pred和DLCO%pred等肺功能参数。本研究根据FVC%pred对通气功能进行分级:正常($\geq 80\%$)、轻度受损($60\% \sim 79\%$)、中度受损($40\% \sim 59\%$)、重度受损($< 40\%$)。

换气功能分级 参照《成人肺功能诊断规范中国专家共识》^[8],采用DLCO%pred对换气功能进行分级:正常($\geq 80\%$)、轻度受损($60\% \sim 79\%$)、中度受损($40\% \sim 59\%$)、重度受损($< 40\%$)。

临床症状、体征的定义与分组 临床症状包括咳嗽、胸闷、气短等,将患者分为有临床症状组($n=79$)和无临床症状组($n=40$)。阳性体征包括Velcro啰音、杵状指等,根据是否存在上述体征将患者分为有阳性体征组($n=68$)和无阳性体征组($n=51$)。

统计学分析 采用SPSS 26.0软件进行数据分析,计量资料经Shapiro-Wilk检验均不符合正态分布,用M(P_{25} , P_{75})表示,组间比较采用Kruskal-Wallis H检验。计数资料用 $n(\%)$ 表示,组间比较采用 χ^2 检验或Fisher确切概率法。用Spearman相关

性检验分析IOS参数与FVC%pred、DLCO%pred的相关性。采用ROC曲线评估IOS参数区分通气功能的效能。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

采用单因素及多因素二元Logistic回归分析,以FVC%pred异常($< 80\%$ 定义为异常)为因变量,筛选其独立影响因素并构建预测模型。单因素分析先筛选出 $P < 0.05$ 的IOS参数,再行Spearman相关分析,若两变量 $r_s > 0.8$,则保留临床意义更明确的变量,排除高度共线性变量;最终采用向前逐步法纳入多因素Logistic回归模型,计算OR(95%CI)。

结 果

ILD患者的临床特征 本研究纳入119例患者,其中男性55例(46.2%),女性64例(53.8%)。年龄为64(57~70)岁, BMI为24.46(22.18~26.44) kg/m², ILD病程为1.50(1.00~2.75)年。不同ILD亚型中,CTD-ILD 76例(63.9%),IPF 16例(13.4%),其他类型27例(22.7%)。79例(66.4%)患者存在相关临床症状,68例(57.1%)有阳性体征。LDH水平为235.00(207.50~278.75) U/L。77例患者有KL-6结果,其余32例无有效记录(如外院报告未记录、患者拒绝检测)。在有效数据中, KL-6 ≤ 500 U/mL者18例(23.4%),500 U/mL $<$ KL-6 $\leq 1\,000$ U/mL者24例(31.2%), $> 1\,000$ U/mL者35例(45.5%),因此未将KL-6作为核心分析变量,仅作描述性总结。在药物治疗方面,64例(53.8%)使用激素,56例(47.1%)使用免疫抑制剂,49例(41.2%)使用抗纤维化药物。按换气功能(DLCO%pred)分级:正常40例(33.6%),轻度受损35例(29.4%),中度受损32例(26.9%),重度受损12例(10.1%);按通气功能(FVC%pred)分级:正常56例(47.1%),轻度受损41例(34.5%),中度受损19例(16.0%),重度受损3例(2.5%)。通气功能受损以轻中度为主,而换气功能受损分布相对均匀,其中重度通气功能受损者例数较少(表1)。

FEV1%pred与FVC%pred的相关性分析 通过Spearman等级相关分析评估FEV1%pred与FVC%pred的相关性,结果显示:FEV1%pred与FVC%pred显著正相关($r_s = 0.903$, $P < 0.001$,图1)。鉴于ILD的核心病理生理改变是限制性通气功能障碍,其特征为肺容积减少,将FVC%pred作为评

表 1 119 例 ILD 患者的临床特征分析
Tab 1 Clinical characteristics of 119 patients with ILD

[M(P ₂₅ , P ₇₅) or n(%)]	
Clinical features	Results
Age (y)	64 (57, 70)
Sex	
Male	55 (46.2)
Female	64 (53.8)
BMI (kg/m ²)	24.46 (22.18, 26.44)
Course of disease (y)	1.50 (1.00, 2.75)
Clinical features	
Yes	79 (66.4)
No	40 (33.6)
Positive signs	
Yes	68 (57.1)
No	51 (42.9)
LDH (U/L)	235.00 (207.50, 278.75)
KL-6 (U/mL)	
≤500	18 (23.4)
(500–1 000]	24 (31.2)
>1 000	35 (45.5)
Hormone drugs	
Yes	64 (53.8)
No	55 (46.2)
Immunosuppressants	
Yes	56 (47.1)
No	63 (52.9)
Anti-fibrotic drugs	
Yes	49 (41.2)
No	70 (58.8)
Gas exchange function	
Normal	40 (33.6)
Mild impairment	35 (29.4)
Moderate impairment	32 (26.9)
Severe impairment	12 (10.1)
Ventilatory function	
Normal	56 (47.1)
Mild impairment	41 (34.5)
Moderate impairment	19 (16.0)
Severe impairment	3 (2.5)

LDH: Lactate dehydrogenase; KL-6: Krebs von den Lungen-6.
估肺容积和限制性通气功能缺陷的核心指标^[7,21-22]。

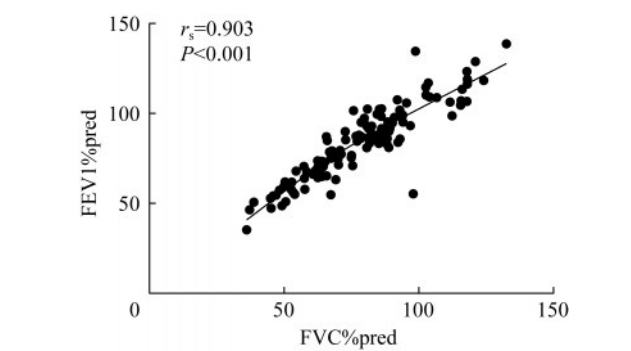


图 1 FEV1%pred 与 FVC%pred 的相关性分析
Fig 1 Correlation analysis between FEV1%pred and FVC%pred

IOS 参数与 ILD 患者通气功能的关系 根据 FVC%pred 将患者分为正常组($n=56$)、轻度受损组($n=41$)、中度受损组($n=19$)和重度受损组($n=3$),比较组间 IOS 参数差异(表 2)。Kruskal-Wallis H 检验结果显示,IOS 参数均随通气功能受损程度加重而显著升高(P 均 <0.001)。其中,重度受损组上述指标均高于正常组和轻、中度受损组。X5 随病情加重而降低($P<0.001$),表明肺弹性阻力逐步增加。随通气功能受损程度加重,中央气道阻力(R_{20} 和 $R_{20}\%$)虽呈升高趋势,但差异无统计学意义($P=0.093,P=0.143$)。上述结果表明,IOS 参数(特别是 Z_5 、 R_5 – R_{20} 、 X_5 、 F_{res} 、 AX)与 ILD 患者通气功能受损程度密切相关。

IOS 参数与 ILD 患者换气功能的关系 根据 DLCO%pred 将患者分为正常组($n=40$)、轻度受损组($n=35$)、中度受损组($n=32$)及重度受损组($n=12$)。比较各组 IOS 参数的差异(表 3),除了 X_5 ($P=0.014$)和 AX ($P=0.019$),其余参数组间差异均无统计学意义。 X_5 随受损加重负值增大,中位数从正常组的 $-0.97\text{ cmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至重度组的 $-1.53\text{ cmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; AX 升高中位数从正常组的 $0.55\text{ cmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 升至重度组的 $0.96\text{ cmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,提示 X_5 和 AX 与 ILD 患者弥散功能有关。

IOS 参数与 FVC%pred 和 DLCO%pred 的相关性 采用 Spearman 相关性分析明确 IOS 参数与 PFT 检测之间的关联(表 4)。结果显示,所有 IOS 参数与 FVC%pred 均显著相关(P 均 <0.05)。其中, AX 的相关性最强($r_s=-0.462,P<0.001$),其次是 $Z_5\%$ ($r_s=-0.443,P<0.001$)和 X_5 ($r_s=0.423,P<0.001$)。相比之下,这些 IOS 参数与 DLCO%pred

表2 间质性肺疾病患者IOS参数与肺通气功能的关系

Tab 2 Relationship between IOS parameters and ventilatory function of the patients with ILD [M(P₂₅, P₇₅)]

IOS parameters	Ventilatory function				H	P
	Normal (n=56)	Mild impairment (n=41)	Moderate impairment (n=19)	Severe impairment (n=3)		
Z5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.50 (3.04, 4.30)	4.39 (3.53, 5.00)	4.94 (3.93, 6.02)	7.67 (5.79, 8.51)	18.668	<0.001
Z5%	98.3 (81.80, 119.03)	119.2 (99.9, 137.70)	123.70 (110.75, 141.80)	173.63 (152.27, 190.82)	21.694	<0.001
R5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.32 (2.90, 4.27)	4.14 (3.28, 4.74)	4.54 (3.74, 5.72)	6.16 (4.99, 7.59)	15.585	0.001
R5%	95.25 (78.95, 116.24)	113.43 (95.20, 130.70)	115.80 (104.10, 137.55)	145.18 (136.39, 176.99)	18.843	<0.001
R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	2.85 (2.39, 3.22)	3.15 (2.54, 3.6)	3.29 (2.82, 3.81)	3.89 (3.16, 4.44)	6.405	0.093
R20%	89.85 (77.28, 106.13)	104.9 (82.70, 118.90)	102.90 (88.25, 116.85)	107.23 (100.87, 121.17)	5.426	0.143
R5-R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.63 (0.33, 0.86)	0.91 (0.58, 1.30)	1.42 (0.91, 1.83)	2.27 (1.83, 3.15)	24.943	<0.001
X5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.91 (-1.34, -0.69)	-1.29 (-1.64, -1.09)	-1.70 (-2.14, -1.31)	-2.47 (-3.48, -1.68)	21.928	<0.001
Fres (Hz)	15.92 (12.88, 17.32)	17.41 (15.91, 19.65)	20.05 (16.95, 21.46)	19.78 (18.03, 25.61)	18.669	<0.001
AX (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.38 (0.22, 0.79)	0.77 (0.57, 1.07)	1.24 (0.82, 1.67)	3.37 (2.07, 3.41)	26.745	<0.001

Group comparisons were performed by the Kruskal-Wallis *H* test. Normal: FVC%pred $\geq$ 80%; Mild impairment: FVC%pred of 60%–79%; Moderate impairment: FVC%pred of 40%–59%; Severe impairment: FVC%pred $<$ 40%. IOS: Impulse oscillometry; ILD: Interstitial lung disease. The severe impairment group had a small sample size, so results should be interpreted with caution.

表3 ILD患者IOS参数与换气功能的关系

Tab 3 Relationship between IOS parameters and gas exchange function of the patients with ILD [M(P₂₅, P₇₅)]

IOS parameters	Gas exchange function				H	P
	Normal (n=40)	Mild impairment (n=35)	Moderate impairment (n=32)	Severe impairment (n=12)		
Z5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.80 (3.22, 4.80)	4.01 (3.24, 4.96)	4.22 (3.50, 5.21)	4.24 (3.06, 4.72)	1.851	0.604
Z5%	104.85 (82.73, 127.15)	118.75 (90.15, 131.95)	117.50 (99.93, 137.80)	122.26 (98.50, 138.83)	3.783	0.286
R5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.68 (3.08, 4.65)	3.72 (3.11, 4.71)	4.01 (3.28, 4.91)	3.90 (2.66, 4.49)	1.331	0.722
R5%	100.55 (81.03, 124.05)	112.8 (82.25, 126.45)	108.70 (97.70, 130.95)	114.84 (85.00, 131.08)	2.437	0.487
R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.02 (2.51, 3.43)	3.08 (2.50, 3.77)	3.08 (2.58, 3.38)	2.67 (1.99, 3.16)	2.924	0.404
R20%	97.40 (84.75, 109.73)	99.00 (82.70, 115.30)	95.55 (83.33, 113.75)	91.40 (72.64, 114.10)	0.825	0.844
R5-R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.71 (0.40, 1.22)	0.68 (0.38, 1.17)	0.94 (0.71, 1.59)	1.03 (0.62, 1.32)	4.247	0.236
X5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.97 (-0.28, -0.69)	-1.32 (-1.69, -0.98)	-1.21 (-1.94, -0.89)	-1.53 (-1.81, -1.27)	10.662	0.014
Fres (Hz)	16.44 (14.02, 18.05)	17.05 (12.80, 19.96)	17.49 (15.88, 20.57)	17.55 (14.96, 19.06)	5.193	0.158
AX (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.55 (0.26, 0.78)	0.69 (0.34, 1.15)	0.82 (0.57, 1.31)	0.96 (0.63, 1.20)	9.992	0.019

Group comparisons were performed by the Kruskal-Wallis *H* test. Normal: DLCO%pred $\geq$ 80%; Mild impairment: DLCO%pred of 60%–79%; Moderate impairment: DLCO%pred of 40%–59%; Severe impairment: DLCO%pred $<$ 40%. IOS: Impulse oscillometry; ILD: Interstitial lung disease.

的关联较弱,其中Z5%($r_s=-0.242, P=0.008$)、R5%($r_s=-0.189, P=0.039$)、R5-R20($r_s=-0.254, P=0.005$)、X5($r_s=0.313, P<0.001$)、Fres($r_s=-0.263, P=0.004$)及AX($r_s=-0.358, P=0.001$)与DLCO%pred有相关性,而Z5、R5、R20和R20%则无相关性。

IOS参数与临床症状及体征的关系 为评估IOS参数的临床实用性,本研究分析了IOS参数与ILD患者临床症状及阳性体征的关系。结果显示(表5),有症状组($n=79$)的R5-R20显著高于无症状组($n=40$) [0.91 (0.56, 1.46) cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹ vs. 0.68 (0.32, 0.91) cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹, $P=0.013$], X5负值更大 [-1.30 (-1.73, -0.91) cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹ vs. -1.00 (-1.34, -0.71) cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹, $P=0.035$]。其余

表4 ILD患者的IOS参数与FVC%pred、DLCO%pred的相关性分析

Tab 4 Correlation analysis between IOS parameters and FVC%pred, DLCO%pred in the patients with ILD

IOS parameters	FVC%pred		DLCO%pred	
	r_s	P	r_s	P
Z5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.364	<0.001	-0.145	0.639
Z5%	-0.443	<0.001	-0.242	0.008
R5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.321	<0.001	-0.085	0.521
R5%	-0.406	<0.001	-0.189	0.039
R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.197	0.031	0.045	0.657
R20%	-0.216	0.018	-0.010	0.915
R5-R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.418	<0.001	-0.254	0.005
X5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.423	<0.001	0.313	<0.001
Fres (Hz)	-0.383	<0.001	-0.263	0.004
AX (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-0.462	<0.001	-0.358	<0.001

IOS 参数的组间差异均无统计学意义。在体征方面(表6),阳性体征组($n=68$)X5 负值显著大于无体征组($n=51$) $[-1.33(-1.78,-0.94)\text{ cmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ vs. $-1.00(-1.33,-0.75)\text{ cmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $P=0.010$],其余

IOS 参数的组间差异均无统计学意义。上述结果表明,R5-R20 及 X5 与 ILD 患者的临床症状及体征存在一定关联,在临床评估中具有实用价值。

表5 ILD 患者的 IOS 参数与临床症状的关系

Tab 5 Relationship between IOS parameters and clinical symptoms in the patients with ILD [M(P ₂₅ , P ₇₅)]				
Variable	Without clinical features (n=40)	With clinical features (n=79)	Z	P
Z5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.72 (3.19, 4.52)	4.14 (3.34, 5.06)	1 338.5	0.175
Z5%	110.60 (84.03, 131.63)	114.80 (95.50, 136.90)	1 457.0	0.491
R5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.54 (3.07, 4.43)	3.91 (3.12, 4.86)	1 352.0	0.201
R5%	107.20 (82.33, 127.08)	107.40 (90.20, 130.35)	1 483.0	0.587
R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	2.92 (2.50, 3.51)	3.10 (2.51, 3.45)	1 525.5	0.761
R20%	103.45 (82.05, 114.38)	94.20 (84.35, 113.75)	1 644.5	0.719
R5-R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.68 (0.32, 0.91)	0.91 (0.56, 1.46)	1 139.5	0.013
X5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-1.00 (-1.34, -0.71)	-1.30 (-1.73, -0.91)	1 955.0	0.035
Fres (Hz)	16.47 (13.49, 18.72)	17.05 (14.72, 19.86)	1 383.0	0.269
AX (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.61 (0.26, 0.83)	0.77 (0.38, 1.17)	1 288.0	0.101

Group comparisons were performed by the Mann-Whitney *U* test.

表6 ILD 患者的 IOS 参数与阳性体征的关系

Tab 6 Relationship between IOS parameters and physical signs in the patients with ILD [M(P ₂₅ , P ₇₅)]				
Variable	Without positive symptoms (n=51)	With positive symptoms (n=68)	Z	P
Z5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.90 (3.16, 4.93)	4.04 (3.36, 5.02)	1 588.5	0.436
Z5%	106.90 (85.40, 130.95)	115.60 (95.58, 137.70)	1 536.5	0.290
R5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.69 (3.08, 4.70)	3.82 (3.12, 4.78)	1 672.5	0.743
R5%	103.90 (83.95, 125.75)	109.95 (90.70, 130.55)	1 624.5	0.558
R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	2.93 (2.53, 3.34)	3.09 (2.48, 3.60)	1 599.0	0.470
R20%	92.50 (78.95, 116.85)	97.98 (84.45, 113.08)	1 608.0	0.500
R5-R20 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.80 (0.42, 1.33)	0.84 (0.53, 1.31)	1 682.0	0.782
X5 (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	-1.00 (-1.33, -0.75)	-1.33 (-1.78, -0.94)	2 217.5	0.010
Fres (Hz)	16.27 (13.88, 18.91)	17.02 (14.96, 19.92)	1 451.5	0.130
AX (cmH ₂ O·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.61 (0.31, 1.02)	0.76 (0.48, 1.20)	1 445.0	0.121

Group comparisons were performed by the Mann-Whitney *U* test.

ROC 曲线评估 IOS 参数对 ILD 患者通气功能的判别效能 ROC 曲线分析显示,AX 的判别效能最佳(AUC=0.746, 95%CI: 0.65~0.84),其次为 R5-R20(AUC=0.727)和 Z5%(AUC=0.730),这些指标均显著优于随机分类(AUC>0.5)。相比之下,R20 和 R20% 的判别能力相对有限(AUC≈0.62)。结果表明,AX 和 R5-R20 具有中等判别效能,可作为辅助评估 ILD 患者通气功能异常的参考指标(图2)。

IOS 参数对 FVC%pred 异常影响的 Logistic 回归分析 为探索 IOS 参数与 FVC%pred 异常之间

的量化关系,本研究将 FVC%pred<80% 定义为通气功能异常,以 10 个 IOS 参数为自变量,进行单因素及多因素二元 Logistic 回归分析。单因素分析显示,Z5、Z5%、R5、R5%、R5-R20、X5、Fres 及 AX 均与 FVC%pred 异常显著相关(P 均<0.05,表7)。多因素 Logistic 回归(向前逐步法)显示:R5-R20(OR=1.99, 95%CI: 1.09~3.64, $P=0.026$)和 X5 (OR=0.40, 95%CI: 0.20~0.84, $P=0.014$)是 FVC%pred 异常的独立影响因素。其中,R5-R20 为独立危险因素(OR>1),X5 为保护因素(OR<1),即 X5 负值越大,通气功能异常风险越高,与 ILD 患者肺弹性下

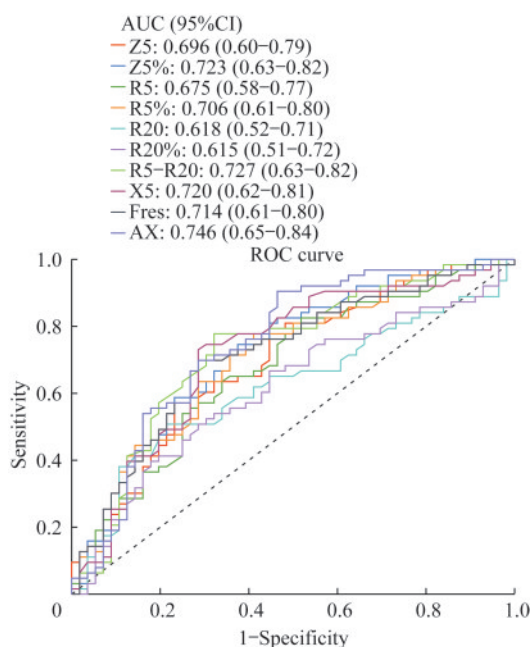


图2 ROC曲线评估IOS参数对ILD患者通气功能的判别效能

Fig 2 Performance of IOS parameters in assessing gas exchange function of the patients with ILD by ROC curve

降的病理生理机制一致。

基于上述结果,本研究建立预测FVC%pred异常的Logistic回归模型,方程如下。公式中, P 为FVC%pred异常的预测概率。该模型将R5-R20、X5与FVC%pred异常风险进行了量化关联,可用于无法完成常规肺功能检查患者的通气功能异常风险评估。

$$\text{logit}(P) = -1.663 + 0.687 \times (R5 - R20) - 0.905 \times X5$$

$$P(\text{FVC}\% \text{pred}) = \frac{1}{1 + \exp(-\text{logit}(P))}$$

表7 IOS参数与FVC%pred异常的单因素Logistic回归分析

Tab 7 Univariate Logistic regression analysis of IOS parameters for FVC%pred abnormality

Variable	OR (95%CI)	P
Z5	1.801 (1.288-2.519)	<0.001
Z5%	1.025 (1.011-1.039)	<0.001
R5	1.643 (1.188-2.272)	0.003
R5%	1.024 (1.010-1.039)	0.001
R20	1.551 (0.977-2.461)	0.066
R20%	1.014 (0.999-1.030)	0.076
R5-R20	2.561 (1.407-4.660)	0.002
X5	0.326 (0.166-0.642)	0.001
Fres	1.139 (1.031-1.258)	0.010
AX	3.859 (1.753-8.493)	<0.001

讨 论

本研究分析了ILD患者IOS参数与通气功能(FVC%pred)及换气功能(DLCO%pred)的关联,以评估IOS在肺功能评估中的差异性价值。结果显示,IOS参数与通气功能损害程度密切相关,能敏感反映外周气道阻力及肺弹性改变,但与换气功能相关性较弱,仅X5、AX与DLCO%pred存在有限关联。

IOS参数与通气功能的关系 随着FVC%pred下降,Z5、Z5%、R5、R5%、R5-R20、Fres及AX均显著升高,X5则显著降低(负值增大),这与ILD的病理生理机制高度一致。肺间质纤维化主要是由于成纤维细胞活化和细胞外基质过度沉积^[23],导致肺实质僵硬、弹性回缩力增强和小气道受累,进而引起肺容积减少和通气功能受限^[3]。Ishikawa等^[11]证实,X5的恶化与IPF患者的死亡率显著相关,支持IOS在肺通气评估中的价值。

在证实组间差异的基础上,进一步相关性分析明确了IOS各参数与通气功能损害的关联强度。分析表明,大部分IOS参数与FVC%pred存在显著相关,其中AX的负相关性最强($r_s = -0.462, P < 0.001$),提示肺弹性阻力的增加与肺容积下降之间存在密切的协同变化关系。ROC曲线分析证实,AX和R5-R20判别通气功能异常具有最佳的诊断效能(AUC分别为0.746和0.727)。值得注意的是,代表小气道功能障碍的指标R5-R20不仅在判别模型中表现优异,其组间差异也尤为明显,而反映中央气道阻力的R20在组间比较中却未见显著差异。这与既往研究揭示ILD病理演变规律高度契合,在病理改变早期,损伤主要累及肺实质及外周小气道,直至疾病晚期,广泛的肺纤维化通过牵拉或继发感染等机制才可能累及中央大气道^[24-25],而本研究纳入人群主要以轻、中度通气功能受损为主,可能尚未出现晚期病理改变。因此,本研究结果进一步表明,在ILD早、中期,AX和R5-R20能够敏感地反映外周气道及肺实质力学异常,可作为评估ILD患者通气功能的首选IOS参考指标,尤其适用于无法完成常规肺功能或需要精细评估小气道功能的患者。值得注意的是,尽管相关性分析提示R20与FVC%pred存在显著弱相关($r_s = -0.197, P = 0.031$),

但组间比较未达到显著性差异($P=0.093$)。这主要与重度通气功能受损组样本量过小($n=3$)导致统计效能不足有关,同时也反映了R20所反映的中心气道阻力在ILD中对通气功能的影响相对较弱。

IOS参数与换气功能的关系 本研究结果显示,IOS参数与换气功能(DLCO%pred)的相关性较弱。仅X5和AX存在统计学关联,且变化幅度远小于其与FVC%pred的变化。这一结果与ILD的生理学机制相符合,DLCO主要反映肺泡-毛细血管膜的弥散功能,受肺泡表面积、血管床容积、血红蛋白浓度等多种因素影响^[26],而IOS检测的是呼吸系统的机械阻抗特性,其参数变化主要反映气道阻力分布和肺组织弹性力学特征^[9],二者分别代表了气体交换与呼吸力学两个相对独立的系统功能范畴。一项关于肺功能数学模型的研究显示,气流力学与气体扩散的生理过程具有可分离性^[23],为IOS难以评估换气功能提供了理论依据。因此,IOS在评估气体交换功能方面具有明显局限性,无法替代DLCO检测。

IOS参数与临床症状的关联及其临床意义 本研究发现,R5-R20和X5与ILD患者的临床症状(咳嗽、胸闷、气短)及阳性体征(Velcro啰音、杵状指)显著相关,有症状或体征者表现为R5-R20升高、X5负值增大。这一发现具有临床实用价值:IOS可客观反映与病理生理改变相关的症状与体征,为无法配合常规PFT的患者提供了替代评估手段;同时将IOS参数与床旁查体相关联,提升了其作为快速评估工具的价值。本研究为后续采用IOS进行动态症状监测与治疗反应评价提供了理论依据,进一步拓展了IOS在ILD患者全程管理中的应用场景。既往研究已证实COPD患者中IOS参数与呼吸困难评分存在相关性^[1],本研究将该结论拓展至ILD人群,进一步支持IOS在呼吸系统疾病症状评估中的应用价值。

本研究结果表明,IOS在ILD患者中更适用于评估限制性通气功能障碍,而非换气功能障碍。鉴于AX(AUC=0.746)和R5-R20(AUC=0.727)具有中等的判别能力,在临床实践中可优先关注这两个参数的变化。虽不足以完全替代传统PFT,但为筛查和初步评估通气功能损害提供了快速、无需用力的补充手段。通过Logistic回归分析建立了基于R5-R20和X5预测FVC%pred异常的量化模型,可

代入患者IOS参数计算预测概率,为无法配合常规PFT的患者提供无创、定量的评估手段。该模型具有较好的临床实用价值,但未来需经内部验证与外部多中心前瞻性研究进一步证实其效能。相关性分析显示IOS参数与DLCO%pred的关联普遍较弱($|r_s|<0.4$),进一步印证IOS在评估换气功能方面的局限性,临床仍需结合DLCO等传统指标全面评估。

与既往研究相比,本研究进一步验证了IOS在ILD肺功能评估中的应用价值,明确了其临床精准定位,具有以下优势:(1)样本量更大,共纳入119例ILD患者^[12];(2)疾病覆盖更广,包含CTD-ILD、IPF等多种亚型;(3)评估维度更精细,以FVC%pred和DLCO%pred分别反映通气与换气功能,系统比较并明确了IOS在两类功能评价中的差异性价值。王倩格等^[10]仅证实IOS与常规肺功能指标存在整体相关性,而本研究进一步证实IOS参数与FVC%pred的相关性显著强于与DLCO%pred的相关性,提示IOS在ILD中的核心价值更侧重于限制性通气功能障碍评估。因此,本研究结论具备更好的外推性与临床适用性。

本研究存在以下局限性。(1)选择偏倚:重度通气功能受损者(FVC%pred<40%)仅3例,占总样本的2.5%,样本量明显不足。主要原因为,本研究为回顾性研究,纳入对象以病情相对稳定的门诊患者为主,且重度呼吸困患者难以配合完成常规PFT。该偏倚可能导致IOS参数在重度患者中的评估效能被高估或低估,因此相关分析与推论需谨慎解释。此外,表2中Fres在中度受损组(20.05 Hz)高于重度受损组(19.78 Hz),未呈持续升高趋势,提示对该指标在重度患者中的解读应更审慎。未来需扩大样本量,纳入更多重度患者以验证参数变化规律。(2)亚型分层不足:本研究中CTD-ILDs占比高达63.9%,结论对该亚群更具代表性;IPF等其他亚型样本量有限,结论外推性需进一步验证。(3)未与HRCT关联分析:HRCT是ILD诊断和评估的金标准,未来研究可整合IOS、PFT和HRCT数据,进行多模态精准评估,以全面揭示IOS参数的临床意义。除了以上3点,未来还应建立回归模型,探索利用AX、R5-R20等核心参数预测FVC%pred的可行性,为无法配合常规PFT的患者提供替代性定量评估工具。

IOS参数与ILD患者的通气功能受损程度显著相关,在评估外周气道阻力与肺弹性变化方面具有明显优势,但与换气功能的相关性较弱。IOS参数可作为肺功能评估的辅助工具,尤其适用于无法配合常规PFT者,但仍需联合DLCO等指标综合判断。此外,R5-R20和X5与患者临床症状及体征密切相关,基于两者的Logistic回归模型可实现通气功能异常的无创量化风险评估。

作者贡献声明 张婷 研究设计,数据整理,统计分析,论文撰写。王蓓 研究设计和指导,数据分析。龚颖 肺功能检查及IOS操作。李丽 肺功能检查及IOS质控。姚欢 数据采集和登记。陈智鸿 研究设计,经费支持,方案制定,论文指导。

利益冲突声明 所有作者均声明不存在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] Maher TM. Interstitial lung disease: a review[J]. *JAMA*, 2024, 331(19): 1655-1665.
- [2] 中华医学会呼吸病学分会,中国医师协会呼吸医师分会. 间质性肺疾病多学科讨论规范中国专家共识[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2023, 46(12): 1176-1188.
- [3] Kamiya M, Carter H, Espindola MS, *et al.* Immune mechanisms in fibrotic interstitial lung disease [J]. *Cell*, 2024, 187(14): 3506-3530.
- [4] Shlobin OA, Aryal Y, Bull JA, *et al.* Pulmonary hypertension associated with lung diseases [J]. *Eur Respir J*, 2024, 64(4): 2401200.
- [5] 中华医学会,中华医学会杂志社,中华医学会全科医学分会等. 中国常规肺功能检查基层指南(2024年)[J]. *中华全科医师杂志*, 2025, 24(2): 121-137.
- [6] Raghu G, Remy-Jardin M, Richeldi L, *et al.* Idiopathic pulmonary fibrosis (an update) and progressive pulmonary fibrosis in adults: an official ATS/ERS/JRS/ALAT clinical practice guideline[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2022, 205(9): e18-e47.
- [7] Ryerson CJ, Adegunsoto A, Piciocchi S, *et al.* Update of the international multidisciplinary classification of the interstitial pneumonias: an ERS/ATS statement [J]. *Eur Respir J*, 2025, 66(6): 2500158.
- [8] 朱蕾,陈荣昌. 成人肺功能诊断规范中国专家共识[J]. *临床肺科杂志*, 2022, 27(7): 973-981.
- [9] 中国医师协会呼吸医师分会肺功能与临床呼吸生理工作委员会,中华医学会呼吸病学分会肺功能学组,中国老年医学会呼吸分会肺功能学组. 肺功能检查技术规范——脉冲振荡技术检查[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2022, 45(10): 960-969.
- [10] 王倩格,燕丛,陈晔,等. 脉冲震荡测量和常规肺功能检查在纤维化性间质性肺疾病中的相关性分析[J]. *国际呼吸杂志*, 2025, 45(7): 572-581.
- [11] Ishikawa T, Nishikiori H, Mori Y, *et al.* The impact of respiratory reactance in oscillometry on survival in patients with idiopathic pulmonary fibrosis [J]. *BMC Pulm Med*, 2024, 24(1): 10.
- [12] Cheng WC, Chang SH, Chen WC, *et al.* Application of impulse oscillometry to detect interstitial lung disease and airway disease in adults with rheumatoid arthritis[J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 331.
- [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] 梁丽娜,姚世华,高怡,等. 肺弥散功能在慢性阻塞性肺疾病中临床应用的研究进展[J]. *国际呼吸杂志*, 2025, 45(6): 536-541.
- [15] Stanojevic S, Kaminsky DA, Miller MR, *et al.* ERS/ATS technical standard on interpretive strategies for routine lung function tests [J]. *Eur Respir J*, 2022, 60(1): 2101499.
- [16] 魏冰,张坤,王正云,等. 阻塞性肺通气功能障碍患者脉冲振荡肺功能检测参数与常规肺通气功能检测指标的相关性[J]. *中华内科杂志*, 2024, 63(11): 1087-1095.
- [17] Guilbert TW, McDowell KM. Impulse oscillometry: gathering speed in the assessment of preschool lung function [J]. *J Allergy Clin Immunol*, 2024, 154(1): 82-83.
- [18] Thamrin C, Robinson PD, Farah CS, *et al.* Technical standards for respiratory oscillometry and bronchodilator response cut-offs [J]. *Eur Respir J*, 2022, 59(3): 2102663.
- [19] Abdo M, Kirsten AM, von Mutius E, *et al.* Minimal clinically important difference for impulse oscillometry in adults with asthma [J]. *Eur Respir J*, 2023, 61(5): 2201793.
- [20] Pellegrino R, Viegi G, Brusasco V, *et al.* Interpretative strategies for lung function tests [J]. *Eur Respir J*, 2005, 26(5): 948-968.
- [21] Boros PW, Martusewicz-Boros MM, Lewandowska KB. Assessment of lung function and severity grading in interstitial lung diseases (% predicted versus z-scores) and association with survival: a retrospective cohort study of 6, 808 patients [J]. *PLoS Med*, 2025, 22(5): e1004619.