

常规胸部CT多域表型预测COPD急性加重风险的价值

刘 轶¹, 周 夏², 邬颖华^{3*}

¹成都中医药大学医学与生命科学学院, 四川 成都

²西部战区总医院, 四川 成都

³成都中医药大学附属医院放射科, 四川 成都

收稿日期: 2026年8月9日; 录用日期: 2026年9月3日; 发布日期: 2026年9月10日

摘 要

目的: 探讨常规胸部CT多域表型预测慢性阻塞性肺疾病(COPD) 12个月中重度急性加重的价值。方法: 回顾性纳入684例COPD患者, 按7:3比例分为建模队列和验证队列。收集临床资料, 并在常规胸部CT上评价肺气肿评分、黏液栓评分、PA/A比值、胸大肌面积指数和胸大肌密度。采用LASSO和多因素Logistic回归构建临床模型、影像模型和联合模型, 并评价区分度、校准度和临床净获益。结果: 252例患者在CT检查后12个月内发生中重度急性加重。联合模型在建模队列和验证队列中的AUC分别为0.884和0.851, 均高于临床模型和影像模型; 校准表现及决策曲线亦显示联合模型具有较好的预测效能。结论: 常规胸部CT多域表型可辅助识别COPD急性加重高风险患者, 具有一定临床应用价值。

关键词

慢性阻塞性肺疾病, 急性加重, 胸部CT, 多域表型, 预测模型

Value of Multidomain Phenotyping on Routine Chest CT in Predicting the Risk of Acute Exacerbation of COPD

Yi Liu¹, Xia Zhou², Yinghua Wu^{3*}

¹School of Medical and Life Sciences, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

²General Hospital of Western Theater Command, Chengdu Sichuan

³Department of Radiology, Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

Received: August 9, 2026; accepted: September 3, 2026; published: September 10, 2026

*通讯作者。

文章引用: 刘轶, 周夏, 邬颖华. 常规胸部 CT 多域表型预测 COPD 急性加重风险的价值[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 1258-1269. DOI: 10.12677/acm.2026.1693161

Abstract

Objective: To explore the value of multidomain routine chest CT phenotyping for predicting 12-month moderate-to-severe acute exacerbation in patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD). **Methods:** This retrospective study included 684 patients with COPD, who were randomly divided into derivation and validation cohorts at a ratio of 7:3. Clinical variables and routine chest CT features, including emphysema score, mucus plug score, pulmonary artery-to-aorta ratio, pectoralis muscle area index and pectoralis muscle attenuation, were collected. LASSO and multi-variable logistic regression were used to develop clinical, imaging and combined models. **Results:** A total of 252 patients developed 12-month moderate-to-severe exacerbation. The combined model achieved AUCs of 0.884 and 0.851 in the derivation and validation cohorts, respectively, and showed better calibration and clinical net benefit than single-domain models. **Conclusion:** Multidomain routine chest CT phenotyping may help identify patients with COPD at high risk of exacerbation and provide an explainable basis for follow-up management.

Keywords

Chronic Obstructive Pulmonary Disease, Acute Exacerbation, Chest CT, Multidomain Phenotype, Prediction Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

COPD 急性加重可导致住院、肺功能加速下降和死亡风险升高，风险分层不能停留在单一肺功能指标。2025 年 GOLD 更新强调急性加重预防、合并症识别和影像学评价在 COPD 管理中的作用[1]。胸部 CT 在 COPD 中的价值也不再局限于肺气肿识别，亚洲胸部影像学会建议同时评价肺实质、气道、血管及相关合并症，以提高结构化报告对临床管理的支持[2]。

定量 CT 预测急性加重已有较好基础。Chaudhary 等建立并外部验证了基于定量 CT 的严重急性加重预测模型，提示肺实质纹理和气道壁结构包含可用于风险预测的信息[3]。Wu 等的外部验证研究进一步显示，影像变量与临床变量联合后可改善 COPD 急性加重预测[4]。

现有研究仍存在三个不足：一是过度依赖复杂后处理软件，基层可复制性不足；二是较少将黏液栓、PA/A 比值和胸大肌消耗纳入同一风险框架；三是部分研究只报告 AUC，校准度、重分类能力和临床净获益报告不足。Etienne 等系统总结了 qCT 预测 AECOPD 研究中的变量异质性和验证不足，提示模型研究需要从单一指标比较转向规范化预测模型评价[5]。

本研究以“肺 - 气道 - 血管 - 骨骼肌综合表型”为中心，使用常规胸部 CT 可获得的半定量或单层测量指标，构建并验证 COPD 12 个月中重度急性加重预测模型。研究重点在于评价多病理通路 CT 整合信息对风险分层的补充价值，并尽量采用临床工作中较易获得的影像指标，以提高方法的可重复性和基层应用可能性。

2. 资料与方法

2.1. 研究设计与研究对象

本研究为回顾性队列研究。连续检索 2023 年 1 月至 2025 年 6 月在西部战区总医院接受胸部 CT 检

查并符合 COPD 诊断标准的患者,随访截止时间为 2026 年 6 月 30 日,以保证所有纳入患者均可完成 CT 检查后 12 个月结局追踪。纳入标准:1) 年龄 ≥ 40 岁;2) 支气管舒张后 FEV1/FVC <0.70 ,或病历中有明确 COPD 诊断且肺功能资料可追溯;3) 胸部 CT 覆盖肺尖至双侧肋膈角,并可显示主动脉弓、主肺动脉和双侧胸大肌;4) 具备 12 个月随访或完整住院、门诊、急诊记录。排除标准:1) 活动性肺癌、活动性肺结核、弥漫性间质性肺疾病或急性肺栓塞;2) 既往胸壁或肺部大手术影响胸大肌和肺结构测量;3) 严重胸廓畸形、金属伪影或呼吸运动伪影;4) 终末期心、肝、肾功能衰竭导致急性呼吸事件难以归因;5) 关键变量缺失且经原始系统复核后仍不能补全。最终纳入 684 例患者,采用计算机随机数法按 7:3 比例分为建模队列 478 例和验证队列 206 例。

2.2. 结局定义、资料收集与变量定义

主要结局为 CT 检查后 12 个月内发生中重度 COPD 急性加重。中度急性加重定义为呼吸困难、咳嗽或咳痰较稳定状态明显恶化,并需要系统糖皮质激素和/或抗菌药物治疗;重度急性加重定义为因症状恶化需要急诊留观、住院、无创通气、有创通气或入住 ICU。随访资料来源于住院病历、门诊及急诊记录;对同一患者多次急性加重,仅以是否发生至少 1 次中重度急性加重作为主要结局。

临床资料包括年龄、性别、BMI、吸烟状态、吸烟指数、COPD 病程、mMRC 评分、CAT 评分、近 1 年急性加重史、既往住院急性加重史、合并症、吸入治疗、家庭氧疗、FEV1%预计值、FEV1/FVC、DLCO% 预计值、白细胞计数、中性粒细胞比例、NLR、CRP、PCT、白蛋白、血红蛋白、PaO₂、PaCO₂ 和 SpO₂。吸烟指数以包年记录;血气指标取 CT 检查前后 24 小时内最接近检查时间的结果;实验室指标取 CT 检查前后 72 小时内最接近检查时间的结果。

2.3. CT 检查方法与影像指标测量

所有患者均接受多层螺旋 CT 扫描,扫描范围自肺尖至双侧肋膈角下方。常规扫描参数为管电压 100~120 kV,自动管电流调节,矩阵 512 $\times$ 512,层厚 5 mm,重建层厚 1.0~1.5 mm。肺窗窗宽约 1500 HU、窗位约 -600 HU;纵隔窗窗宽约 350 HU、窗位约 40 HU。增强检查患者仅使用平扫或静脉期图像测量胸大肌和血管参数。

肺气肿视觉评分按双肺各叶低密度区范围半定量评价,每叶 0~4 分,右中叶和舌段按独立叶段处理,总分 0~24 分。黏液栓评分按受累肺段数记录,范围 0~18 分。支气管壁增厚和支气管扩张按有无记录。PA/A 比值在肺动脉主干层面测量主肺动脉最大径和同层面升主动脉最大径。胸大肌参数在主动脉弓层面勾画双侧胸大肌 ROI,计算双侧面积总和、身高校正后的胸大肌面积指数以及平均 CT 值。

2.4. 观察者一致性与质量控制

两名具有胸部影像诊断经验的放射科医师在未知结局信息的情况下独立完成测量。连续变量取两名医师测量均值;分类征象不一致时由第三名高年资医师复核。正式测量前随机抽取 60 例进行预训练和判读标准统一。影像测量完成后再次随机抽取 15%病例进行重复测量,用于评价观察者间一致性和复测稳定性。资料录入采用双人独立录入和第三人核对方式。异常值按原始影像、检验系统和病历记录逐项追溯;连续变量超出临床合理范围时重新复核原始报告。缺失变量先判断缺失机制,缺失率低于 10%的变量采用多重插补,缺失率较高或缺失机制不可解释的变量不进入主模型。

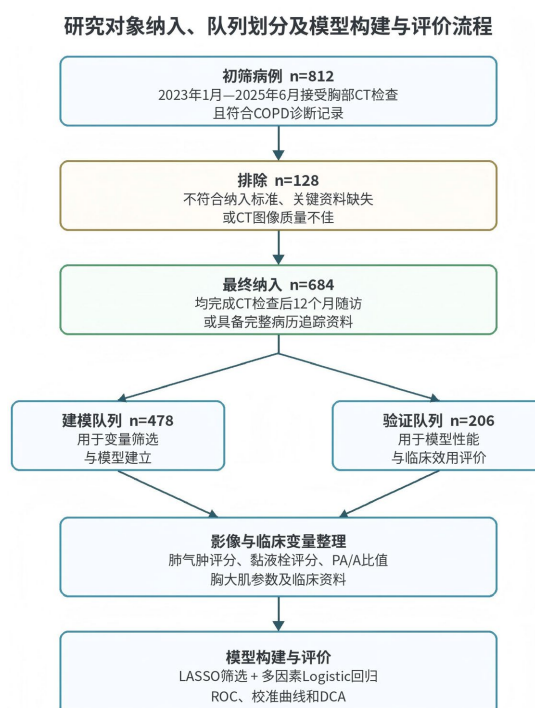
2.5. 统计学方法

统计分析同时报告区分度、校准度和临床效用,避免仅用 AUC 判断模型优劣[6]。验证队列用于评价模型稳定性,重点控制病例来源、结局定义和预测变量测量方式的一致性[7]。

候选变量先结合临床意义和共线性诊断进行初筛，再采用 LASSO 回归筛选变量，惩罚参数 λ 通过 10 折交叉验证确定。最终纳入多因素 Logistic 回归构建临床模型、影像模型和联合模型，并报告 β 值、OR 值、95% CI 和 P 值。模型以 $\text{Logit}(P) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i$ 表示，预测概率用于后续 ROC、校准和临床决策曲线分析。

模型报告参照临床预测模型报告规范[8]，重点呈现研究对象来源、预测变量测量、结局定义、缺失值处理、模型构建和验证过程，以降低选择偏倚和报告偏倚[9]。

临床效用采用 DCA 评价[10]，主要根据不同阈值概率下的净获益判断模型是否具有应用价值。ROC 曲线比较采用 DeLong 检验[11]，同时报告 Brier 评分、校准斜率、NRI 和 IDI；DCA 结果以曲线和阈值范围描述，不单独以 P 值作为判断依据。连续变量符合正态分布时以均数 $\pm$ 标准差表示，组间比较采用独立样本 t 检验；非正态分布时以中位数(四分位数)表示，组间比较采用 Mann-Whitney U 检验；分类变量以例数(百分比)表示，组间比较采用 χ^2 检验。双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。研究对象纳入、影像测量和模型评价流程见图 1。



注：478/206约为7:3队列划分；如采用随机分层划分，可在正文或图注中说明。

Figure 1. Flowchart of participant inclusion, imaging measurements, and model evaluation

图 1. 研究对象纳入、影像测量和模型评价流程图

3. 结果

3.1. 研究对象与结局发生情况

本研究共纳入 684 例 COPD 患者，其中 252 例在 CT 检查后 12 个月内发生中重度急性加重。与未发

生急性加重者相比,发生急性加重者在年龄、症状负担、既往急性加重史、肺功能、炎症反应、营养状态
和血气指标等方面总体临床负荷更重。主要基线资料比较见表 1。

Table 1. Comparison of baseline characteristics between the two groups of COPD patients
表 1. 两组 COPD 患者基线资料比较

指标	未发生急性加重(n = 432)	发生急性加重(n = 252)	统计量/效应量	P 值
年龄(岁)	67.4 ± 7.5	71.2 ± 7.1	t = -6.46; SMD = 0.52	<0.001
男性	288 (66.7)	195 (77.4)	$\chi^2 = 8.81$; $\phi = 0.11$	0.003
BMI (kg/m ²)	23.9 ± 3.4	22.3 ± 3.6	t = 5.72; SMD = 0.46	<0.001
当前吸烟	151 (35.0)	125 (49.6)	$\chi^2 = 14.31$; $\phi = 0.14$	<0.001
吸烟指数(包年)	31.0 (12.0, 48.0)	45.0 (25.0, 64.0)	Z = -6.42; r = 0.25	<0.001
COPD 病程(年)	6.8 ± 3.7	9.4 ± 4.2	t = -8.61; SMD = 0.66	<0.001
mMRC 评分(分)	1.0 (1.0, 2.0)	2.0 (1.0, 3.0)	Z = -7.94; r = 0.30	<0.001
CAT 评分(分)	12.6 ± 5.3	18.4 ± 6.1	t = -13.03; SMD = 1.02	<0.001
慢性支气管炎表型	144 (33.3)	133 (52.8)	$\chi^2 = 25.45$; $\phi = 0.19$	<0.001
近 1 年急性加重史	116 (26.9)	130 (51.6)	$\chi^2 = 42.39$; $\phi = 0.25$	<0.001
既往住院急性加重史	52 (12.0)	71 (28.2)	$\chi^2 = 28.82$; $\phi = 0.21$	<0.001
家庭氧疗史	34 (7.9)	58 (23.0)	$\chi^2 = 31.67$; $\phi = 0.22$	<0.001
GOLD 3~4 级	147 (34.0)	124 (49.2)	$\chi^2 = 15.45$; $\phi = 0.15$	<0.001
FEV1%预计值(%)	56.7 ± 12.8	44.9 ± 13.6	t = 11.33; SMD = 0.90	<0.001
FEV1/FVC	0.54 ± 0.08	0.48 ± 0.09	t = 8.74; SMD = 0.71	<0.001
DLCO%预计值(%)	62.4 ± 13.5	51.6 ± 14.8	t = 9.79; SMD = 0.76	<0.001
NLR	2.7 (1.9, 4.1)	4.8 (3.1, 7.2)	Z = -9.28; r = 0.35	<0.001
CRP (mg/L)	7.9 (4.3, 13.8)	17.6 (8.8, 32.5)	Z = -8.27; r = 0.32	<0.001
PCT (ng/mL)	0.05 (0.03, 0.09)	0.12 (0.06, 0.23)	Z = -7.66; r = 0.29	<0.001
白蛋白(g/L)	40.6 ± 4.2	37.4 ± 4.6	t = 9.25; SMD = 0.73	<0.001
PaO ₂ (mmHg)	78.6 ± 11.2	70.8 ± 12.7	t = 8.09; SMD = 0.65	<0.001
PaCO ₂ (mmHg)	42.0 ± 6.8	48.3 ± 8.4	t = -10.08; SMD = 0.82	<0.001
SpO ₂ (%)	94.2 ± 2.9	91.1 ± 4.2	t = 10.29; SMD = 0.86	<0.001

注:表中列出主要临床基线变量。SMD 为标准化均数差, ϕ 为列联系数。BMI 为体质量指数, mMRC 为改良英国医学研究委员会呼吸困难量表, CAT 为 COPD 评估测试, DLCO 为一氧化碳弥散量, NLR 为中性粒细胞/淋巴细胞比值, PCT 为降钙素原。

3.2. CT 多域影像参数比较

CT 多域影像参数显示,发生急性加重者不仅表现为肺气肿程度加重,还同时伴随气道黏液负荷增加、气道结构异常增多、肺血管负荷升高及胸壁骨骼肌储备下降。肺实质、气道、血管和肌肉四个影像域均可观察到方向一致的组间差异。见表 2。

Table 2. Comparison of multidomain CT imaging parameters between the two groups of COPD patients**表 2.** 两组 COPD 患者 CT 多域影像参数比较

影像参数	未发生急性加重(n = 432)	发生急性加重(n = 252)	统计量/效应量	P 值
肺气肿视觉评分(分)	7.1 ± 3.1	10.6 ± 3.8	t = -12.39; SMD = 1.01	<0.001
黏液栓评分(分)	1.0 (0.0, 2.0)	3.0 (1.0, 5.0)	Z = -9.84; r = 0.38	<0.001
支气管壁增厚	162 (37.5)	169 (67.1)	$\chi^2 = 55.49$; $\phi = 0.29$	<0.001
支气管扩张	72 (16.7)	84 (33.3)	$\chi^2 = 26.21$; $\phi = 0.20$	<0.001
空气潴留征	164 (38.0)	152 (60.3)	$\chi^2 = 31.69$; $\phi = 0.22$	<0.001
PA/A 比值	0.86 ± 0.09	0.96 ± 0.11	t = -12.31; SMD = 1.00	<0.001
PA/A ≥ 1	56 (13.0)	88 (34.9)	$\chi^2 = 47.22$; $\phi = 0.26$	<0.001
胸大肌面积指数(cm ² /m ²)	12.9 ± 2.6	10.9 ± 2.4	t = 10.12; SMD = 0.80	<0.001
胸大肌密度(HU)	36.9 ± 6.0	31.8 ± 6.8	t = 10.18; SMD = 0.80	<0.001
膈肌厚度(mm)	3.6 ± 0.7	3.2 ± 0.7	t = 7.23; SMD = 0.57	<0.001

注：PA/A 为肺动脉主干直径与升主动脉直径之比。

3.3. 影像参数观察者间一致性

影像测量复核结果显示，主要连续影像指标的观察者间一致性达到良好至优秀水平，分类影像征象的一致性达到较好水平，说明肺气肿评分、黏液栓评分、PA/A 比值和胸大肌参数具有较稳定的重复测量基础。表 3 所列一致性检验均有统计学意义(均 $P < 0.001$)。见表 3。

Table 3. Interobserver agreement analysis of CT imaging parameters**表 3.** CT 影像指标观察者间一致性分析

影像指标	一致性指标	数值(95% CI)	复测误差	P 值
肺气肿视觉评分	ICC	0.89 (0.86~0.92)	0.8 分	<0.001
黏液栓评分	ICC	0.84 (0.79~0.89)	0.6 分	<0.001
PA/A 比值	ICC	0.93 (0.90~0.95)	0.03	<0.001
胸大肌面积指数	ICC	0.94 (0.91~0.96)	0.6 cm ² /m ²	<0.001
胸大肌密度	ICC	0.90 (0.86~0.93)	2.2 HU	<0.001
支气管壁增厚	Kappa	0.78 (0.71~0.85)	—	<0.001
支气管扩张	Kappa	0.81 (0.75~0.88)	—	<0.001

注：ICC 用于连续变量一致性评价，Kappa 用于分类变量一致性评价。

3.4. 12 个月中重度急性加重相关因素

LASSO 筛选后，肺功能、炎症指标和 CT 多域影像参数共同进入多因素 Logistic 回归模型。最终模型保留的变量覆盖肺功能损害、炎症激活、肺实质破坏、气道黏液负荷、肺血管负荷和胸壁骨骼肌消耗六个方面。FEV1%预计值降低、CRP 升高、肺气肿视觉评分升高、黏液栓评分升高、PA/A 比值升高、胸大肌面积指数降低和胸大肌密度降低均与 12 个月中重度急性加重相关，差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。见表 4、见图 2。

Table 4. Multivariable logistic regression analysis of 12-month moderate-to-severe acute exacerbation
表 4. 12 个月中重度急性加重的多因素 Logistic 回归分析

变量	β 值	OR 值	95% CI	P 值
FEV1%预计值每降低 10%	0.392	1.48	1.25~1.76	<0.001
CRP 每升高 10 mg/L	0.226	1.25	1.12~1.41	<0.001
肺气肿视觉评分每升高 1 分	0.104	1.11	1.06~1.17	<0.001
黏液栓评分每升高 1 分	0.171	1.19	1.11~1.27	<0.001
PA/A 比值每升高 0.1	0.451	1.57	1.28~1.94	<0.001
胸大肌面积指数每降低 1 cm ² /m ²	0.186	1.20	1.10~1.32	<0.001
胸大肌密度每降低 5 HU	0.247	1.28	1.11~1.48	0.001

注：OR > 1 表示急性加重风险升高；连续变量按表中单位换算。

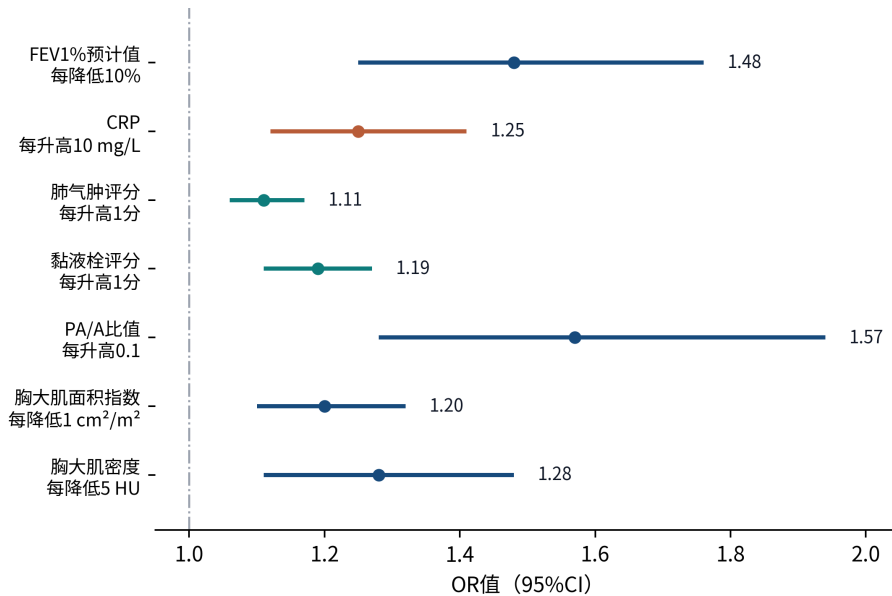


Figure 2. Forest plot of factors associated with 12-month moderate-to-severe acute exacerbation
图 2. 12 个月中重度急性加重相关因素的森林图

3.5. 模型区分度、校准度与重分类能力

在建模队列和验证队列中，联合模型均表现出更高的区分度和更低的整体预测误差。与临床模型相比，影像模型和联合模型的重分类能力均提高，其中联合模型的改善幅度最大。DeLong 检验、NRI 和 IDI 结果显示模型间差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。校准曲线同时呈现临床模型、影像模型和联合模型，联合模型的整体预测误差和校准斜率表现更优。见表 5、图 3。

Table 5. Comparison of predictive performance among different models
表 5. 不同模型的预测性能比较

模型	队列	AUC (95% CI)	Brier 评分/校准斜率	重分类指标(P 值)
临床模型	建模	0.781 (0.739~0.823)	0.168/0.91	参照

续表

影像模型	建模	0.836 (0.800~0.872)	0.139/0.96	NRI = 0.214, IDI = 0.052 (均 P < 0.001)
联合模型	建模	0.884 (0.853~0.915)	0.112/0.99	NRI = 0.387, IDI = 0.091 (均 P < 0.001)
临床模型	验证	0.752 (0.684~0.821)	0.176/0.88	参照
影像模型	验证	0.812 (0.753~0.871)	0.148/0.93	NRI = 0.196 (P = 0.004), IDI = 0.046 (P = 0.006)
联合模型	验证	0.851 (0.798~0.904)	0.126/0.97	NRI = 0.342, IDI = 0.078 (均 P < 0.001)

注：NRI 和 IDI 均以临床模型为参照；Brier 评分越低表示整体预测误差越小。

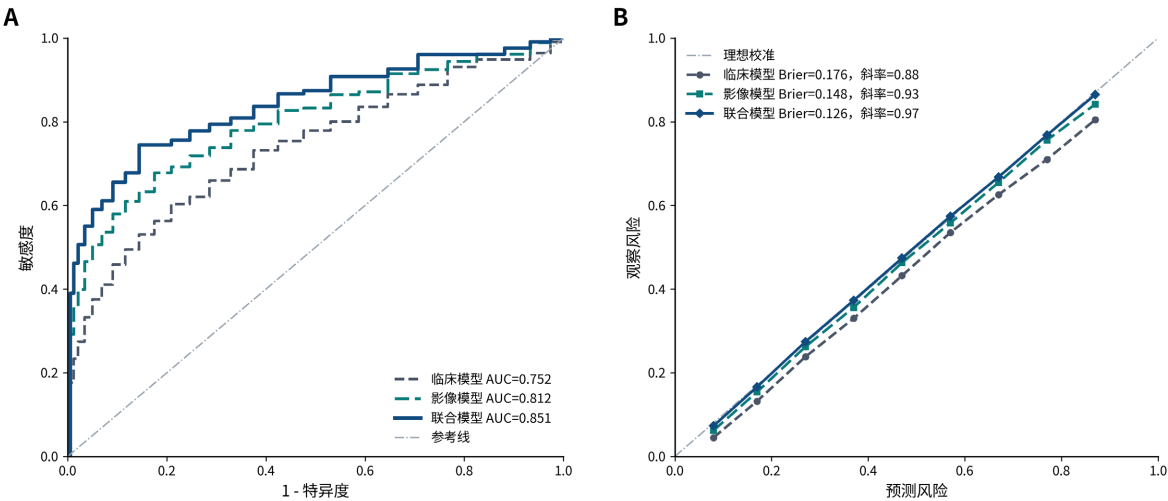


Figure 3. Predictive performance and calibration of different models. (A) ROC curves in the validation cohort; (B) Calibration curves in the validation cohort

图 3. 不同模型预测效能与校准表现。(A) 验证队列 ROC 曲线；(B) 验证队列校准曲线

3.6. 临床决策曲线与分层应用

决策曲线分析显示，在临床常用阈值概率范围内，联合模型较临床模型和影像模型具有更高净获益。依据联合模型预测概率进行低、中、高风险分层后，中重度急性加重发生率呈阶梯式升高，重度急性加重事件亦主要集中于高风险组。DCA 结果主要依据净获益曲线解释，风险分层结果采用趋势检验评价。见表 6、图 4。

Table 6. Clinical utility and risk stratification results of the combined model

表 6. 联合模型的临床效用与风险分层结果

分析项目	比较对象	结果	P 值
DCA 阈值范围	联合模型对临床模型	15%~60%阈值概率范围内净获益更高	—
低风险组	预测风险 < 20%	急性加重发生率 12.6%	<0.001

续表

中风险组	预测风险 20%~50%	急性加重发生率 34.8%	<0.001
高风险组	预测风险 > 50%	急性加重发生率 68.9%	<0.001
重度急性加重	高风险组对低风险组	住院或通气事件显著增加	<0.001

注：DCA 为决策曲线分析，主要用于观察不同阈值概率下的净获益，不单独报告 P 值。风险分层界值依据建模队列预测概率分布和临床可解释性确定。

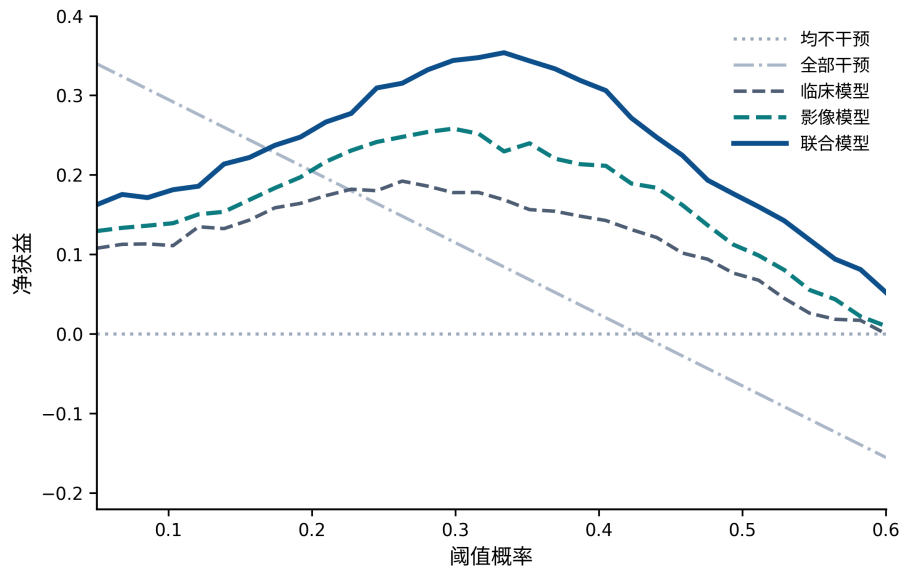


Figure 4. Clinical decision curve analysis of different models
图 4. 不同模型的临床决策曲线分析

3.7. 敏感性分析与亚组验证

敏感性分析结果与主分析方向一致。无论采用完整病例分析、多重插补分析，还是将结局限定为重度急性加重，联合模型均保持较好的预测性能；在 GOLD 2 级、GOLD 3~4 级及无既往急性加重史亚组中，联合模型相对临床模型的增量价值仍具有统计学意义(均 $P < 0.05$)。见表 7。

Table 7. Sensitivity analyses and subgroup validation of the combined model
表 7. 联合模型的敏感性分析与亚组验证

分析方式	样本范围	核心结果	P 值
完整病例分析	624 例	联合模型区分度保持最高	<0.001
多重插补分析	684 例	主要预测变量方向一致	<0.001
仅重度急性加重	住院/急诊/通气事件	联合模型仍优于临床模型	0.002
GOLD 2 级亚组	312 例	联合模型优于临床模型	0.004
GOLD 3~4 级亚组	271 例	联合模型优于临床模型	<0.001
无既往急性加重史亚组	438 例	联合模型仍能识别高风险患者	0.006

注：核心结果以联合模型相对临床模型的区分度、校准度和净获益综合判断。

4. 讨论

本研究显示, 常规胸部 CT 所获得的肺气肿、黏液栓、PA/A 比值和胸大肌参数能够共同构成有解释力的多域表型。胸大肌面积指数和胸大肌密度降低是关键阳性结果之一。Wang 等发现, 胸部 CT 量化的呼吸相关肌群与 COPD 严重程度及急性加重有关, 提示肌肉指标不仅反映营养状态, 也可能反映长期低氧、慢性炎症和活动受限造成的系统性损害[12]。Li 等报道 CT 来源胸大肌面积和密度与 COPD 病情严重程度和呼吸症状相关, 支持胸大肌参数进入风险模型[13]。Zhou 等在前瞻性人群队列中进一步证明, 胸大肌面积与气流受限程度和呼吸结局有关, 说明常规 CT 中的单层肌肉测量具有机会性筛查价值[14]。

胸大肌参数不能直接替代肌力测定, 但可以提示肺康复和营养干预需求。Razat 等发现胸部 CT 来源胸大肌面积可用于识别 COPD 患者股四头肌无力, 表明胸大肌指标具有功能相关性[15]。不同肌群代表的功能储备并不完全一致, Liu 等报道竖脊肌横截面积可预测 COPD 死亡风险, 提示未来可比较胸大肌、竖脊肌和膈肌的增量价值[16]。对急性加重重症患者而言, 肌少症还可能影响机械通气耐受和恢复过程, Dai 等关于 ECOPD 危重患者的研究支持 CT 诊断肌少症具有长期预后价值[17]。Bunk 等在吸烟者中观察到胸部脂肪和肌肉测量与肺气肿及支气管壁增厚相关, 说明体成分与气道-肺实质表型存在共同病理基础[18]。

肺气肿视觉评分在本研究中仍保留为肺内结构核心变量。Baraghoshi 等在 COPDGene 研究中显示 CT 可用于评价肺气肿长期进展, 特别是在吸烟暴露持续存在时肺密度下降更明显[19]。不过, 肺结构测量受扫描协议、重建算法和图像质量影响, Motahari 等关于肺定量 CT 重复性的研究提示, 影像测量必须进行协议控制和质量复核[20]。因此, 本研究没有把肺气肿评分孤立解释为唯一风险来源, 而是把它作为肺结构破坏维度纳入联合模型, 避免了单项影像指标的过度解释。

黏液栓评分是本研究的重要气道域指标。Diaz 等在 JAMA 研究中指出, CT 可见的气道阻塞性黏液栓与 COPD 死亡风险相关, 提示黏液负荷具有明确预后意义[21]。Mettler 等提出“silent mucus plugs”概念, 说明即使缺乏明显咳嗽症状, CT 仍可能发现具有临床意义的黏液栓[22]。Wan 等在两个独立队列中证实, 胸部 CT 黏液栓与未来 COPD 急性加重风险增加相关, 这与本研究黏液栓评分进入多因素模型一致[23]。van der Veer 等进一步证明, AI 自动量化气道阻塞性黏液栓与 COPD 全因死亡有关, 提示本研究采用的视觉评分未来可向自动化测量过渡[24]。

PA/A 比值升高构成本文的血管域证据。Tomas 等研究显示, PA/A 比值可作为 AECOPD 患者临床恶化和通气支持需求的非侵入性指标[25]。Lee 等在住院 AECOPD 患者中发现, $PA/A \geq 1$ 与高流量氧疗、无创通气和插管需求相关, 说明该指标反映的不仅是血管直径变化, 也可能是长期低氧、肺血管重构和右心负荷增高的综合结果[26]。本研究将 PA/A 比值与肺气肿、黏液栓和胸大肌参数共同建模, 可以更接近 COPD 急性加重的多通路风险机制。

联合模型优于单域模型符合 COPD 异质性特征。Yang 等发现不同 CT 表型 COPD 患者在心血管事件和急性加重方面存在差异, 提示影像评价应服务于具体结局风险而不是停留在疾病分型[27]。Johnson 等通过聚类分析识别了肺动脉增宽 COPD 患者中的定量 CT 亚组, 说明血管改变需要结合肺实质和气道指标共同解释[28]。Wakazono 等报道高气道-血管体积比和视觉支气管扩张与急性加重相关, 进一步支持气道与血管结构失衡在 AECOPD 中的作用[29]。Kirby 和 Parraga 关于 T-slope 的讨论则提示, 新型 CT 指标在推广前必须同时满足可解释性、稳定性和临床可用性[30]。

本研究的临床意义在于将放射科常规胸部 CT 由“发现病灶”扩展为“风险分层”。核心变量均可在常规薄层 CT 上获得, 不增加扫描序列和辐射暴露; 联合模型可将患者分为低、中、高风险层级, 为呼吸科随访、吸入治疗优化、肺康复、营养支持和感染预防提供提示; 模型中每个变量均有明确病理生理指

向, 较黑箱模型更利于临床解释。本研究仍存在一定局限: 单中心回顾性设计可能造成选择偏倚; 视觉评分具有一定主观性; 胸大肌单层测量不能完全代表全身肌肉状态; 验证队列仍来自同一医疗体系, 尚缺乏多中心外部验证。

5. 结论

常规胸部 CT 肺气肿视觉评分、黏液栓评分、PA/A 比值、胸大肌面积指数和胸大肌密度均与 COPD 12 个月中重度急性加重相关。肺 - 气道 - 血管 - 骨骼肌综合表型构建的联合模型较单域模型具有更好的区分度、校准度和临床净获益。该方法能够在不增加检查负担的前提下拓展胸部 CT 的慢病管理价值, 并为 COPD 急性加重风险分层提供可解释影像依据。

参考文献

- [1] Venkatesan, P. (2025) GOLD COPD Report: 2025 Update. *The Lancet Respiratory Medicine*, **13**, e7-e8. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(24\)00413-2](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(24)00413-2)
- [2] Fan, L., Seo, J.B., Ohno, Y., Lee, S.M., Ashizawa, K., Lee, K.Y., *et al.* (2025) Chest CT in the Evaluation of Chronic Obstructive Pulmonary Disease: Recommendations of Asian Society of Thoracic Radiology. *British Journal of Radiology*, **99**, 1478-1492. <https://doi.org/10.1093/bjr/tqaf111>
- [3] Chaudhary, M.F.A., Hoffman, E.A., Guo, J., Comellas, A.P., Newell, J.D., Nagpal, P., *et al.* (2023) Predicting Severe Chronic Obstructive Pulmonary Disease Exacerbations Using Quantitative CT: A Retrospective Model Development and External Validation Study. *The Lancet Digital Health*, **5**, e83-e92. [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(22\)00232-1](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(22)00232-1)
- [4] Wu, J., Lu, Y., Dong, S., Wu, L. and Shen, X. (2024) Predicting COPD Exacerbations Based on Quantitative CT Analysis: An External Validation Study. *Frontiers in Medicine*, **11**, Article ID: 1370917. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1370917>
- [5] Etienne, S., Hoheisel, A., Agarwal, P., Kiefer, S., Wehrle, J., Renz, H., *et al.* (2025) Quantitative Computed Tomography and Predictive Modelling for COPD Exacerbations. *European Respiratory Review*, **34**, Article ID: 250097. <https://doi.org/10.1183/16000617.0097-2025>
- [6] Collins, G.S., Dhiman, P., Ma, J., Schluskel, M.M., Archer, L., Van Calster, B., *et al.* (2024) Evaluation of Clinical Prediction Models (Part 1): From Development to External Validation. *BMJ*, **384**, e074819. <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-074819>
- [7] Riley, R.D., Archer, L., Snell, K.I.E., Ensor, J., Dhiman, P., Martin, G.P., *et al.* (2024) Evaluation of Clinical Prediction Models (Part 2): How to Undertake an External Validation Study. *BMJ*, **384**, e074820. <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-074820>
- [8] Collins, G.S., Moons, K.G.M., Dhiman, P., *et al.* (2024) TRIPOD + AI Statement: Updated Guidance for Reporting Clinical Prediction Models That Use Regression or Machine Learning Methods. *BMJ*, **385**, e078378.
- [9] Moons, K.G.M., Damen, J.A.A., Kaul, T., Hooft, L., Andaur Navarro, C., Dhiman, P., *et al.* (2025) PROBAST + AI: An Updated Quality, Risk of Bias, and Applicability Assessment Tool for Prediction Models Using Regression or Artificial Intelligence Methods. *BMJ*, **388**, e082505. <https://doi.org/10.1136/bmj-2024-082505>
- [10] Zhao, L., Leng, Y., Hu, Y., Xiao, J., Li, Q., Liu, C., *et al.* (2024) Understanding Decision Curve Analysis in Clinical Prediction Model Research. *Postgraduate Medical Journal*, **100**, 512-515. <https://doi.org/10.1093/postmj/qgae027>
- [11] He, Z., Zhang, Q., Song, M., Tan, X. and Wang, W. (2024) Four Overlooked Errors in ROC Analysis: How to Prevent and Avoid. *BMJ Evidence-Based Medicine*, **30**, 208-211. <https://doi.org/10.1136/bmjebm-2024-113078>
- [12] Wang, K., Wu, F., He, H., Hu, C., Chen, X., Chen, J., *et al.* (2024) Association between Computed Tomography-Quantified Respiratory Muscles and Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Retrospective Study. *BMC Pulmonary Medicine*, **24**, Article No. 150. <https://doi.org/10.1186/s12890-024-02955-5>
- [13] Li, C., Lian, X., He, J., Gao, X., Liu, X., Bao, C., *et al.* (2024) Association of Computed Tomography-Derived Pectoralis Muscle Area and Density with Disease Severity and Respiratory Symptoms in Patients with Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Case-Control Study. *Respiratory Medicine*, **233**, Article ID: 107783. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2024.107783>
- [14] Zhou, K., Wu, F., Zhao, N., Zheng, Y., Deng, Z., Yang, H., *et al.* (2025) Association of Pectoralis Muscle Area on Computed Tomography with Airflow Limitation Severity and Respiratory Outcomes in COPD: A Population-Based Prospective Cohort Study. *Pulmonology*, **31**, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2023.02.004>
- [15] Razat, L., Tamisier, R., Destors, M., Arbib, F., Ruez-Lantuéjoul, L., Loiodice, C., *et al.* (2025) Pectoral Muscle Area

- Derived from Chest Computed Tomography to Identify Quadriceps Muscle Weakness in COPD. *ERJ Open Research*, **11**, Article ID: 00380-2025. <https://doi.org/10.1183/23120541.00380-2025>
- [16] Liu, J., Li, R., Li, Y., Ge, S., Yao, S., Zhang, R., *et al.* (2025) The Cross-Sectional Area of Erector Spinae Muscles Obtained from Chest CT Is an Independent Predictor of Death in COPD. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, **20**, 1555-1565. <https://doi.org/10.2147/copd.s520971>
 - [17] Dai, X., Zhou, Q., Wang, Q., Wang, M., Zhao, W., Zhou, Q., *et al.* (2025) Sarcopenia Diagnosed by Chest CT Predicts Long-Term Mortality in Critically Ill Patients with Exacerbation of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *European Journal of Radiology*, **192**, Article ID: 112373. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2025.112373>
 - [18] Bunk, S.A.O., Ipema, J., Sidorenkov, G., Bennink, E., Vliegthart, R., de Jong, P.A., *et al.* (2024) The Relationship of Fat and Muscle Measurements with Emphysema and Bronchial Wall Thickening in Smokers. *ERJ Open Research*, **10**, Article ID: 00749-2023. <https://doi.org/10.1183/23120541.00749-2023>
 - [19] Baraghoshi, D., Strand, M., Humphries, S.M., San José Estépar, R., Vegas Sanchez-Ferrero, G., Charbonnier, J., *et al.* (2023) Quantitative CT Evaluation of Emphysema Progression over 10 Years in the COPDGene Study. *Radiology*, **307**, e222786. <https://doi.org/10.1148/radiol.222786>
 - [20] Motahari, A., Barr, R.G., Han, M.K., Anderson, W.H., Barjaktarevic, I., Bleecker, E.R., *et al.* (2023) Repeatability of Pulmonary Quantitative Computed Tomography Measurements in Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **208**, 657-665. <https://doi.org/10.1164/rccm.202209-1698pp>
 - [21] Diaz, A.A., Orejas, J.L., Grumley, S., Nath, H.P., Wang, W., Dolliver, W.R., *et al.* (2023) Airway-Occluding Mucus Plugs and Mortality in Patients with Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *JAMA*, **329**, 1832-1839. <https://doi.org/10.1001/jama.2023.2065>
 - [22] Mettler, S.K., Nath, H.P., Grumley, S., Orejas, J.L., Dolliver, W.R., Nardelli, P., *et al.* (2024) Silent Airway Mucus Plugs in COPD and Clinical Implications. *Chest*, **166**, 1010-1019. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2023.11.033>
 - [23] Wan, E., Yen, A., Elalami, R., Grumley, S., Nath, H.P., Wang, W., *et al.* (2025) Airway Mucus Plugs on Chest Computed Tomography Are Associated with Exacerbations in Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **211**, 814-822. <https://doi.org/10.1164/rccm.202403-0632oc>
 - [24] van der Veer, T., Andrinopoulou, E., Braunstahl, G., Charbonnier, J.P., Kim, V., Latisenko, R., *et al.* (2025) Association between Automatic AI-Based Quantification of Airway-Occlusive Mucus Plugs and All-Cause Mortality in Patients with COPD. *Thorax*, **80**, 105-108. <https://doi.org/10.1136/thorax-2024-221928>
 - [25] Tomas, G., Çapar, A., Baraç, Y., Tollu, B., Abacı, C., Başlılar, Ş., *et al.* (2025) Is the Pulmonary Artery to Aorta Ratio a Prognostic Indicator in Acute Exacerbation of COPD? *BMC Pulmonary Medicine*, **25**, Article No. 522. <https://doi.org/10.1186/s12890-025-03980-8>
 - [26] Lee, J., Kho, B., Yoon, J., Yoon, C., Na, Y., Park, H., *et al.* (2024) The Clinical Characteristics Associated with the Ratio between the Main Pulmonary Artery and Ascending Aorta Diameter in Patients with Acute Exacerbation of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Journal of Thoracic Disease*, **16**, 4924-4934. <https://doi.org/10.21037/jtd-24-62>
 - [27] Yang, H., Ryu, M.H., Carey, V.J., Young, K., Kinney, G.L., Dransfield, M.T., *et al.* (2024) Differential Association of COPD Subtypes with Cardiovascular Events and COPD Exacerbations. *Chest*, **166**, 1360-1370. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2024.07.148>
 - [28] Johnson, S.W., Ross, J.C., Nardelli, P., Choi, B., Vanderpool, R.R., Pistenmaa, C., *et al.* (2025) Cluster Analysis Identifies Quantitative CT Imaging-Based Subgroups in COPD Subjects with Pulmonary Artery Enlargement. *European Respiratory Journal*, **66**, Article ID: 2500038. <https://doi.org/10.1183/13993003.00038-2025>
 - [29] Wakazono, N., Shimizu, K., Tanabe, N., Oguma, A., Makita, H., Okada, K., *et al.* (2025) High Airway-to-Vessel Volume Ratio and Visual Bronchiectasis Are Associated with Exacerbations in COPD. *Respirology*, **30**, 1131-1140. <https://doi.org/10.1111/resp.70114>
 - [30] Kirby, M. and Parraga, G. (2024) Uncovering Early COPD? The T-Slope as a Novel CT Biomarker for Evaluating Airway Narrowing. *European Respiratory Journal*, **64**, Article ID: 2401849. <https://doi.org/10.1183/13993003.01849-2024>