

全肺平均碘浓度与灌注缺损体积百分比对急性肺栓塞危险分层的预测价值

周牧野¹, 朱林¹, 梁啸寒¹, 郭飞^{1,2}

(1. 蚌埠医科大学第一附属医院放射科, 安徽 蚌埠 233004; 2. 蚌埠医科大学医学影像学院医学影像诊断学教研室, 安徽 蚌埠 233030)

【摘要】目的: 探讨能谱 CT 全肺平均碘浓度 (MeanIP) 及灌注缺损体积百分比 (PDVR) 对急性肺栓塞 (APE) 危险分层的预测价值。**方法:** 选取 80 例经能谱 CT 扫描确诊为 APE 的患者为研究对象, 根据临床及影像资料分为高危组 ($n=14$)、中高危组 ($n=30$) 和中低危组 ($n=36$)。比较三组患者临床及能谱 CT 资料, 构建预测中高危及以上组的能谱参数 Logistic 模型, 采用 ROC 曲线下面积 (AUC) 评估模型效能, 通过 DeLong 检验比较模型间的差异。**结果:** 三组患者能谱参数的 MeanIP、PDVR 比较, 差异有统计学意义 ($P<0.05$); MeanIP、PDVR 及 MeanIP+PDVR 预测模型的 AUC 分别为 0.822、0.810 和 0.887; DeLong 检验显示, MeanIP+PDVR 预测模型与 MeanIP 或 PDVR 预测模型比较, 差异有统计学意义 ($P<0.05$), 其中 MeanIP+PDVR 联合模型的预测效能最佳。**结论:** MeanIP 结合 PDVR 可有效预测 APE 的危险分层, 可为临床决策提供重要的影像学依据。

【关键词】 能谱 CT; 急性肺栓塞; 危险分层; 全肺平均碘浓度; 灌注缺损体积百分比

【中图分类号】 R445.3; R563.5 **【文献标志码】** A

The predictive value of mean whole-lung iodine perfusion and perfusion defect volume ratio in predicting risk stratification of acute pulmonary embolism

ZHOU Mu-ye¹, ZHU Lin¹, LIANG Xiao-han¹, GUO Fei^{1,2}

(1. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Bengbu Medical University, Bengbu 233004; 2. Department of Medical Imaging Diagnosis, School of Medical Imaging, Bengbu Medical University, Bengbu 233030, Anhui, China)

【Abstract】Objective: To investigate the predictive value of mean whole-lung iodine perfusion (MeanIP) and perfusion defect volume ratio (PDVR) as derived from spectral CT in the risk stratification of acute pulmonary embolism (APE). **Methods:** A retrospective analysis was conducted on 80 patients diagnosed with APE via spectral CT scans. Patients were classified based on clinical and imaging data into high-risk ($n=14$), intermediate-high risk ($n=30$), and intermediate-low risk ($n=36$) groups. Clinical and spectral CT data were compared across these groups, and a Logistic model was developed using perfusion parameters to predict risk stratification of intermediate-high or high-risk groups. The model's efficacy was evaluated using the area under the ROC curve (AUC), and differences between models were assessed with the DeLong test. **Results:** Statistically significant differences were observed in MeanIP and PDVR of spectral parameters among the three groups ($P<0.05$). The AUCs for the MeanIP, PDVR, and MeanIP+PDVR prediction models were 0.822, 0.810, and 0.887, respectively. The DeLong test revealed significant differences between the combined MeanIP+PDVR model and the models using only MeanIP or PDVR, indicating the superior predictive performance of the combined model ($P<0.05$). **Conclusion:** MeanIP combined with PDVR can effectively predict the risk stratification of APE, providing critical imaging evidence for clinical decision-making.

【Key words】 Spectral CT; Acute pulmonary embolism; Risk stratification; Mean whole-lung iodine perfusion; Perfusion defect volume ratio

急性肺栓塞 (acute pulmonary embolism, APE) 是因栓子 (内源性或外源性) 导致肺动脉血流受阻的严重急症。确诊常采用 CT 肺动脉造影, 并依据欧洲心脏病学会 (ESC) 指南对患者进行高危、

中高危、中低危及低危四级危险分层^[1]。中高危患者面临血流动力学失代偿和循环衰竭风险,常规抗凝基础上需加强监测与干预措施,如溶栓或介入治疗,防止病情进一步发展。因此,明确是否达中高危程度对临床决策至关重要,但现有分组过程相对繁琐且需综合多种指标。近年来,尽管有研究尝试通过心血管影像指标、栓塞区域碘量测定和肺灌注缺损指数来评估 APE 的风险等级,但部分心血管参数(如肺动脉栓塞指数)的可靠性和重复性存在争议,且碘量测定需手动勾画感兴趣区(region of interest, ROI),这不仅增加了工作量,也可能导致评估的主观误差^[2-4]。目前,利用全肺平均碘浓度(mean whole-lung iodine perfusion, MeanIP)及灌注缺损体积百分比(perfusion defect volume ratio, PDVR)预测 APE 危险分层的研究较为少见。联合这两项参数能够全面评估肺部的整体和局部血流灌注状态,为 APE 的早期评估和治疗提供更有力的影像学依据。本研究旨在探讨 MeanIP 及 PDVR 对 APE 危险分层的预测价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2022 年 9 月至 2024 年 11 月蚌埠医科大学第一附属医院收治的 80 例经能谱 CT 扫描确诊为 APE 的患者为研究对象,其中男性 42 例,女性 38 例;年龄(57.66 ± 14.12)岁;糖尿病 37 例,慢性肺部疾病 47 例,慢性心力衰竭 49 例,肺癌 44 例,下肢静脉栓塞 43 例。根据临床及影像资料将患者分为高危组($n=14$)、中高危组($n=30$)和中低危组($n=36$)确诊为 APE 的患者。本项研究入组患者均经过医院伦理委员会审核通过,豁免知情同意。纳入标准:(1)均行能谱 CT 扫描,能谱参数完整无缺失;(2)临床确诊为 APE,诊断标准符合中华医学会 2018 年提出的《肺血栓栓塞症诊治与预防指南》^[5]。排除标准:(1)非首次确诊为肺栓塞;(2)有过抗凝或再灌注治疗史;(3)存在中重度冠心病(存在明确症状、经影像学或临床评估诊断为中重度冠状动脉狭窄或需接受介入治疗者)、中重度肺气肿、严重心肺疾病(如重度肺气肿、肺纤维化和肺动脉高压等);(4)图像质量不佳,存在明显运动或放射伪影。

1.2 方法

1.2.1 CT 检查 采用 GE 256 排 Revolution CT,患者仰卧位、头先进,扫描覆盖区域肺尖至肋膈角。使用能谱扫描模式,管电压瞬时切换(80/140 kVp, 0.5 ms),管电流 100~200 mA;重建层厚、间隔 0.625 mm,视野 350 mm $\times$ 350 mm,重建矩阵 512

$\times$ 512。增强扫描通过高压注射器经右肘静脉完成,先注射碘海醇 50 mL(350 mgI/mL),速率 3.5~4.0 mL/s,随后推注 20 mL 生理盐水。触发扫描的监测点设在肺动脉主干,阈值设定为 100 HU。

1.2.2 能谱灌注参数测量 采用 GSI Viewer 4.7 后处理平台,选取层厚、层间距均为 0.625 mm 的 GSI 序列增强图像,提取全肺碘覆盖可视化图像,通过直方图直接计算生成 MeanIP;采用 Thoracic VCAR 成像分析软件包,选取上述全肺碘覆盖可视化图像进行肺实质组织分析并自动提取全肺体积,调整图像阈值、进行彩色编码并分析肺灌注缺损体积,利用灌注缺损体积/全肺体积计算 PDVR。所有数据由一名主治医师进行观测,副主任医师进行回顾性审核,当出现不一致结果时由副主任医师重新评估。

1.2.3 肺栓塞危险分层^[5] 肺栓塞的危险分层基于其严重程度和早期死亡风险。血流动力学不稳定是高危组核心特征,表现为收缩压低于 90 mmHg 持续超过 15 min 或下降幅度超过 40 mmHg。中危组要求血流动力学稳定,并结合 CT 影像右心功能不全(右心室/左心室舒张末期内径比 >1)及心脏生物学标志物(如 BNP、NT-proBNP、肌钙蛋白)异常情况,进一步划分为中高和中低危组。中高危组需同时满足影像学异常和生物学标志物升高,而中低危组仅满足其中之一。

1.3 观察指标

(1)患者临床资料及能谱参数;(2)MeanIP、PDVR 预测中高危及以上组 APE 的效能;(3)各模型预测中高危及以上组 APE 的诊断效能。

1.4 统计学分析

采用 R 语言(Version 4.2)对数据进行分析。计量资料符合正态分布且方差齐性,以($\bar{x} \pm s$)表示,多组间比较采用单因素方差分析,多个均数两两比较行 LSD- t 检验;计数资料以 $[n(\%)]$ 表示,组间比较行独立样本 χ^2 检验;相关性采用 Pearson 相关系数分析;利用 Logistic 回归分析构建预测模型, Hosmer-Lemeshow 检验评估拟合优度;诊断效能采用受试者工作特征(ROC)曲线分析,并通过 DeLong 检验模型间的差异。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 三组患者临床资料及能谱参数比较

临床资料中,三组患者慢性肺疾病、慢性心力衰竭和下肢静脉栓塞比较,差异有统计学意义($P < 0.05$);慢性肺疾病和慢性心力衰竭在中高危组与中低危组比较,差异有统计学意义($P < 0.05$)。下肢静

脉栓塞在高危组与中低危组、中高危组与中低危组间比较,差异均有统计学意义($P<0.05$)。三组患者能谱参数的 MeanIP、PDVR 比较,差异有统计学意义($P<0.05$)。相关性分析显示,MeanIP 与 APE 分组负相关($r=-0.573,P<0.001$),PDVR 与 APE 分组正相关($r=0.582,P<0.001$)。见表 1。

2.2 MeanIP、PDVR 预测中高危及以上组 APE 的效能

表 1 三组患者临床治疗及能谱参数比较[$\bar{x}\pm s,n(\%)$]

组别	临床资料							能谱参数	
	年龄(岁)	男/女	糖尿病	慢性肺疾病	慢性心力衰竭	肺癌	下肢静脉栓塞	MeanIP(mg/cm3)	PDVR(%)
高危组($n=14$)	65.21±12.67	6(42.86)/8(57.14)	5(35.71)	10(71.43)	8(57.14)	9(64.29)	11(78.57)	0.72±0.25	34.91±10.77
中高危组($n=30$)	57.47±14.31	18(60.00)/12(40.00)	18(60.00)	22(73.33)	24(80.00)	19(63.33)	21(70.00)	1.05±0.51 ^①	27.01±11.04 ^①
中低危组($n=36$)	54.89±13.79	18(50.00)/18(50.00)	14(38.89)	15(41.67) ^②	17(47.22) ^②	16(44.44)	11(30.56) ^{①②}	1.60±0.54 ^{①②}	15.87±9.53 ^{①②}
F/χ^2 值	2.823	1.289	3.691	7.897	7.528	2.950	14.447	19.542	20.064
P 值	0.066	0.525	0.158	0.019	0.023	0.229	0.001	<0.001	<0.001

① $P<0.05$,与高危组比较;② $P<0.05$,与中高危组比较。

表 2 MeanIP、PDVR 预测中高危及以上组 APE 的效能

模型	AUC 值	95%CI	截断值	准确性(%)	特异度(%)	敏感度(%)	阳性预测值(%)	阴性预测值(%)
MeanIP	0.822	0.730~0.914	1.182 mg/cm ³	78.75	80.56	77.27	82.93	74.36
PDVR	0.810	0.715~0.905	20.035%	78.75	72.22	84.09	78.72	78.79
MeanIP+PDVR	0.887	0.813~0.961	0.569	83.75	86.11	81.82	87.80	79.49

2.3 各模型预测中高危及以上组 APE 的诊断效能比较

DeLong 检验显示,MeanIP+PDVR 联合模型分别与 MeanIP、PDVR 模型比较,差异均有统计学意义($P<0.05$),而 MeanIP 与 PDVR 模型比较,组间差异无统计学意义($P>0.05$)。见表 3。

表 3 各模型预测中高危及以上组 APE 的诊断效能比较

模型比较	AUC 差值	95%CI	Z 值	P 值
MeanIP vs. PDVR	0.012	-0.104~0.128	0.208	0.835
MeanIP+PDVR vs. MeanIP	0.065	0.001~0.129	1.979	0.048
MeanIP+PDVR vs. PDVR	0.077	0.010~0.144	2.256	0.024

3 讨论

APE 患者主要表现为心脏负荷加重和氧合能力下降,未及时治疗可能会发展成慢性肺动脉高压,从而长期影响生活质量,而大面积的 APE 可迅速致命^[6]。因此,依据患者的危险程度进行及时准确的诊断与治疗,是降低 APE 的危害、预防致命风险和避免长期健康问题的关键。能谱 CT 作为一种动态肺灌注的替代方法,在诊断 APE 方面表现出高达约 95%的特异度,有效减少了 APE 的过度诊断^[7-8]。该技术通过高低能量切换扫描,获取物质在不同能

量下的衰减信息,利用衰减特性映射技术生成碘分布图像。此外,使用含碘对比剂增强了碘的显影效果,使血液中碘的分布和聚集更加突出。能谱 CT 利用碘的能量吸收特性,直观呈现肺部血流灌注分布,可用于评估血管功能和潜在阻塞情况^[9]。与需多次扫描的灌注 CT 相比,能谱 CT 通过单次扫描即可获取丰富的血流灌注信息,不仅优化了扫描过程,还提高了诊断效率和辐射安全性。

本研究基于能谱 CT 的 MeanIP 和 PDVR 构建模型预测中高危及以上组 APE 风险,结果表明 MeanIP 与 PDVR 的组间两两比较,差异均有统计学意义($P<0.05$),而能谱参数与 APE 的分层有相关性($P<0.001$),与既往研究^[10-11]结果一致。单独采用 MeanIP 预测中高危及以上组 APE 的风险,得到 AUC 为 0.822。碘定量分析在评估肺栓塞患者的栓子负荷、右心功能不全及治疗效果具有重要意义,MeanIP 有效反映了肺组织的平均碘分布情况^[12]。既往研究也显示 MeanIP 与肺栓塞严重程度负相关,能有效预测中高危肺栓塞风险($AUC=0.835$),其效能优于手工绘制栓塞区域 ROI 的方法($AUC=0.785$),表明 MeanIP 提供了一种整体评估肺部灌注的新途径。此外,还有研究^[13]通过放置 ROI 测量平均碘含量,证实碘基图能有效预测中高危 APE($AUC=0.848$)。尽管该方法也能探究碘分

布,但采用 MeanIP 能更客观、准确地评估整体低灌注区的碘浓度,提高评估的重复性和可靠性。既往研究^[14-15]证实,PDVR 与阻塞评分存在相关性($r=0.68, P<0.001$),并提出 PDVR 可以评估短期临床不良结果的风险。这一发现强调了 PDVR 作为评价肺栓塞严重程度的有效性。在本研究中,使用 PDVR 进行预测的 AUC 为 0.810,进一步证实了其作为风险评估工具的可靠性。尽管某些心血管参数与右心功能不全的相关性被认为有助于肺栓塞的危险分层,但灌注缺损参数提供了更优越的预测效能^[16]。此外,PDVR 作为一种半自动定量分析方法,观察者间的一致性已经得到了验证($ICC=0.96, P<0.001$)^[17],这使得 PDVR 更适用于不同研究间的比较和复制,为临床实践提供了通用且易于实施的评估工具。

本研究进一步结合 MeanIP 和 PDVR 构建 Logistic 联合模型预测中高危及以上组 APE 风险,其 AUC 达到 0.887,显示出较高的预测效能。此外,与单一参数模型相比,联合模型的性能优于仅使用 MeanIP 或 PDVR 的模型($Z=1.979/2.256, P<0.05$)。MeanIP 反映了肺部组织的平均血流灌注水平,而 PDVR 揭示了肺部灌注的不均匀性。结合两者可精确提供肺部全局血流及局部异常灌注缺损的信息,全面反映肺部血流灌注的状况。

综上,本研究将 MeanIP 与 PDVR 联合应用于预测 APE 危险分层的模型中,增强了预测能力,为临床评估 APE 风险提供了重要参考。

参考文献

- [1] Konstantinides SV, Meyer G, Becattini C, *et al.* 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of acute pulmonary embolism developed in collaboration with the European Respiratory Society (ERS)[J]. *European Heart Journal*, 2020, 41(4): 543–603.
- [2] Surov A, Thormann M, Bär C, *et al.* Validation of clinical-radiological scores for prognosis of mortality in acute pulmonary embolism[J]. *Respiratory Research*, 2023, 24(1): 195.
- [3] 杨秀娟,凌佳龙,李建蓉. 能谱 CT 肺灌注缺损指数评估急性肺栓塞危险分层:与肺动脉栓塞指数的对比[J]. *放射学实践*, 2020, 35(12): 1532–1536.
- [4] 张锋政,黄军荣,谢紫东,等. 肺栓塞肺动脉能谱 CT 胸部扫描影像特征及其诊断价值[J]. *中国医学物理学杂志*, 2023, 40(2): 186–189.
- [5] 中华医学会呼吸病学分会肺栓塞与肺血管病学组,中国医师协会呼吸医师分会肺栓塞与肺血管病工作委员会,全国肺栓塞与

肺血管病防治协作组. 肺血栓栓塞症诊治与预防指南[J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(14): 1060–1087.

- [6] Lyhne MD, Schultz JG, Mortensen CS, *et al.* Immediate cardiopulmonary responses to consecutive pulmonary embolism: a randomized, controlled, experimental study[J]. *BMC Pulmonary Medicine*, 2024, 24(1): 233.
- [7] Lee HJ, Wanderley M, da Silva Rubin VC, *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.
- [8] Grob D, Smit E, Prince J, *et al.* Iodine maps from subtraction CT or dual-energy CT to detect pulmonary emboli with CT angiography: a multiple-observer study[J]. *Radiology*, 2019, 292(1): 197–205.
- [9] Alizadeh LS, Vogl TJ, Waldeck SS, *et al.* Dual-energy CT in cardiothoracic imaging: current developments[J]. *Diagnostics*, 2023, 13(12): 2116.
- [10] 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.
- [11] 杨秀娟,李俊,管川江,等. 双能量 CT 灌注成像对急性肺栓塞危险分层的价值[J]. *实用放射学杂志*, 2022, 38(2): 200–203.
- [12] Singh R, Nie RZ, Homayounieh F, *et al.* Quantitative lobar pulmonary perfusion assessment on dual-energy CT pulmonary angiography: applications in pulmonary embolism[J]. *European Radiology*, 2020, 30(5): 2535–2542.
- [13] 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.
- [14] Jawad S, Ulriksen PS, Kalhauge A, *et al.* Acute pulmonary embolism severity assessment evaluated with dual energy CT perfusion compared to conventional CT angiographic measurements[J]. *Diagnostics*, 2021, 11(3): 495.
- [15] Im DJ, Hur J, Han KH, *et al.* Acute pulmonary embolism: retrospective cohort study of the predictive value of perfusion defect volume measured with dual-energy CT[J]. *AJR American Journal of Roentgenology*, 2017, 209(5): 1015–1022.
- [16] Perez-Johnston R, Plodkowski AJ, Halpenny DF, *et al.* Perfusion defects on dual-energy CTA in patients with suspected pulmonary embolism correlate with right heart strain and lower survival[J]. *European Radiology*, 2021, 31(4): 2013–2021.
- [17] Foldyna B, Zangeneh FA, Wagner M, *et al.* Pulmonary perfusion defect volume on dual-energy CT: prognostic marker of adverse events in patients with suspected pulmonary embolism[J]. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2023, 39(7): 1333–1341.

(收稿日期: 2024-12-27

修回日期: 2025-03-19)