

## 论 著

## 双能CT肺血管成像联合CTPA指导肺栓塞诊断及病情分级的效能\*

张秋云\* 杨富阁 岳志斌  
河南中医药大学第一附属医院放射科  
(河南 郑州 450000)

**【摘要】目的** 探究双能CT肺血管成像(DEPI)联合CT肺血管造影(CTPA)指导肺栓塞(PE)诊断及病情分级中的应用价值。**方法** 选取我院2023年1月至2024年1月收治的86例首诊疑似PE患者为研究对象,于入院后24 h内完成DEPI及CTPA检查,分析DEPI、CTPA及联合检查在指导PE诊断及病情分级中的效能。**结果** 86例疑似PE患者经影像学资料结合体征、实验室指标等综合判断,最终确诊PE 76例,排除PE 10例。DEPI、CTPA检查最终都确诊PE 72例,排除PE 14例;联合检查最终确诊PE 75例,排除PE 11例。DEPI、CTPA及联合检查灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值比较无统计学差异( $P>0.05$ ),但联合检查准确度高于DEPI、CTPA检查( $P<0.05$ );且联合检查诊断PE与“金标准”一致性高于DEPI、CTPA检查(Kappa值分别为0.946、0.711、0.614)。病情分级4级的PE患者CTPA肺栓塞指数高于1~3级患者,且3级高于1~2级,2级高于1级(均 $P<0.05$ );病情分级3~4级的PE患者DEPI肺灌注缺损指数高于1~2级患者,2级高于1级(均 $P<0.05$ ),但3级、4级之间比较差异不具有统计学意义( $P>0.05$ )。将病情分级3~4级定义为病情危重,1~2级定义为病情低中危,受试者工作特征曲线分析显示,肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合对PE病情分级均有一定的诊断效能( $P<0.05$ ),其曲线下面积分别为0.955、0.888、0.989,其中联合诊断效能最高,敏感度为100.00%,特异度为87.23%。**结论** DEPI、CTPA检查在指导PE诊断及病情分级中具有较高效能,且二者联合可实现优势互补,显著提高PE诊断准确率与病情分级效能。

**【关键词】** 双能CT肺血管成像;  
多层螺旋CT血管造影;肺栓塞;  
诊疗;病情分级

**【中图分类号】** R563

**【文献标识码】** A

**【基金项目】** 河南省中医药科学研究  
专项课题(2023ZXZX1097)

**DOI:**10.3969/j.issn.1672-5131.2026.03.018

## Efficiency of Dual-energy CT Pulmonary Perfusion Imaging Combined with CTPA on Guiding the Diagnosis and Disease Grading of Pulmonary Embolism\*

ZHANG Qiu-yun\*, YANG Fu-ge, YUE Zhi-bin.

Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Henan University of CM, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

## ABSTRACT

**Objective** To explore the application value of dual-energy CT pulmonary perfusion imaging (DEPI) combined with CT pulmonary angiography (CTPA) on guiding the diagnosis and disease grading of pulmonary embolism (PE). **Methods** 86 patients with suspected PE who were first diagnosed in the hospital from January 2023 to January 2024 were selected as the research subjects. DEPI and CTPA were completed within 24 hours after admission. The efficiency of DEPI, CTPA and combined examination on guiding PE diagnosis and disease grading was analyzed. **Results** Among the 86 suspected PE patients, 76 cases were confirmed and 10 cases were excluded by imaging data combined with physical signs and laboratory indicators. DEPI and CTPA confirmed 72 cases of PE and excluded 14 cases, and combined examination confirmed 75 cases of PE and excluded 11 cases. There were no statistical differences in sensitivity, specificity, positive predictive value and negative predictive value among DEPI, CTPA and combined examination ( $P>0.05$ ), but the accuracy of combined examination was higher than that of DEPI or CTPA ( $P<0.05$ ). The consistency between combined examination and gold standard in diagnosing PE was higher than that of DEPI or CTPA (Kappa=0.946, 0.711, 0.614). The CTPA pulmonary embolism index of PE patients with disease grade 4 was higher than that of PE patients with grade 1-3, and was higher in patients with grade 3 than that in patients with grade 1-2, and was higher in patients with grade 2 than that in patients with grade 1 (all  $P<0.05$ ). The DEPI pulmonary perfusion defect index of PE patients with grade 3-4 was higher than that of PE patients with grade 1~2, and the index in patients with grade 2 was higher than patients with grade 1 (all  $P<0.05$ ), but there was no statistical significance between grade 3 and grade 4 ( $P>0.05$ ). Disease grade 3~4 was defined as critical disease, and grade 1~2 was defined as low-to-medium risk disease. Receiver operating characteristic curve showed that pulmonary embolism index, pulmonary perfusion defect index and combination had certain diagnostic efficiency on disease grading of PE ( $P<0.05$ ), and the areas under the curves were 0.955, 0.888 and 0.989 respectively. Combined diagnosis had the highest efficiency, and its sensitivity and specificity were 100.00% and 87.23%. **Conclusion** DEPI and CTPA have high efficiency on guiding the diagnosis and disease grading of PE, and the combination of the two can achieve complementary advantages and significantly improve the diagnostic accuracy rate and disease grading efficiency of PE.

**Keywords:** Dual-energy CT Pulmonary Perfusion Imaging; Multi-Slice Spiral CT Angiography; Pulmonary Embolism; Diagnosis and Treatment; Disease Grading

肺栓塞(PE)是由于全身各处、各种栓子脱落阻塞肺动脉及其动脉分支而引起肺循环功能障碍的疾病,最常见的栓子为血栓,栓子通常来源于下肢<sup>[1]</sup>。PE患者可表现为不明原因的呼吸困难、出冷汗、咳嗽、胸痛等症状,并伴随有脑组织缺氧症状,如抽搐、昏迷等<sup>[2]</sup>。PE具有较高的误诊率及病死率,且近些年PE发病率有逐年增高趋势,因此早期识别、诊断PE对临床决策具有重要意义<sup>[3]</sup>。但PE疾病并无特异性临床表现,临床很难通过患者体征、症状等确诊,以及判断病情严重程度。CT肺血管造影(CTPA)是PE确诊常用手段,可显示肺动脉内栓子形态、范围,用于PE诊断及严重程度评估准确度较高,但Zantonelli G等<sup>[4]</sup>研究中发现,CTPA在肺动脉亚段以下微小栓子栓塞诊断具有一定的局限性,并且无法显示肺动脉灌注情况。近些年,双能CT肺血管成像(DEPI)技术快速发展,因诊断PE敏感度、特异度高特点,逐渐被应用于PE疾病诊断,且该技术分辨率高可显示肺动脉远端微小栓子引起的灌注缺损,弥补了CTPA技术的不足之处<sup>[5]</sup>。因此笔者推测二者联合诊断,可同时观察栓塞引起的局部及远端血管变化,但二者诊断PE一致性及对病情分级评估效能尚无定论。基于此,DEPI联合CTPA指导PE诊断及病情分级中的应用价值,结果如下。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 选取我院2023年1月至2024年1月收治的86例首诊疑似PE患者为研究对象,男性47例,女性39例,年龄29~72岁,平均(55.17±8.41)。

纳入标准:首诊疑似PE者;临床资料完整;D-二聚体显著升高;接受DEPI及CTPA检

【第一作者】张秋云,女,主管技师,主要研究方向:肺栓塞影响诊断。E-mail: zhangqiuyun1901@163.com

【通讯作者】张秋云

查,且影像资料清晰可用。排除标准:造影剂过敏者;合并恶性肿瘤者;合并肝、肾等严重功能障碍者;凝血功能障碍者;合并心衰、心梗等其他心血管疾病者;合并慢阻肺、重症肺炎等其他肺部疾病者;急性感染期患者;血管强化程度低,存在严重运动伪影者。

## 1.2 方法

**1.2.1 检查方法** 在入院24 h内,利用飞利浦双源CT先进行胸部区域CT平扫,患者取平卧位,均匀呼吸,扫描范围为肺尖至肺底,扫描完成后进行双能增强扫描。具体方法为:利用双筒高压注射器,通过肘正中静脉以4.5 mL/s的速率注入50 mL碘佛醇(江苏恒瑞医药股份有限公司,国药准字H20113430,100ml:32g),并以相同速率注入生理盐水(西安京西双鹤药业有限公司,国药准字H20058668,250ml:2.25g)与碘佛醇7:3比例混合液30 mL,最后注射生理盐水50 mL进行冲管,扫描范围为胸廓入口至膈肌,扫描方向为头足方向,参数设置为:管电流260 mAs、55 mAs,管电压100 kV、150 kV,层厚3 mm,螺距0.7,准直64 mm×0.6 mm,视野30 cm×30 cm~35 cm×35 cm,扫描速度0.25 s/r,肺动脉扫描时间10~15 s,动脉内阈值大100 HU即可获得原始影像图片。

**1.2.2 影像图片分析** 成像数据及图片自动上传至后处理系统,生成DEPI、CTPA影像资料,由2名经验丰富的核医学医师以双盲法阅片,结果有异议时请第3位医师阅片。DEPI诊断PE标准如下<sup>[6]</sup>:病灶血管与对侧和相邻正常血管相比较,存在灌注稀疏或缺损。CTPA诊断PE标准如下<sup>[7]</sup>:病灶动脉血管出现造影剂低密度充盈缺损。并依据Chae等方法<sup>[8]</sup>计算DEPI肺灌注缺损指数,依据Qanadil指数评价法<sup>[9]</sup>计算CTPA肺栓塞指数。

病情分级标准:采用肺栓塞严重程度指数(PESI)<sup>[10]</sup>评价病情分级,包括年龄、性别、收缩压等评分项目,总分≤65分为1级,66~85分为2级,86~105分为3级,106~125分为4级,>125分为5级。

**1.3 统计学方法** 用SPSS 22.0分析,计数资料以n(%)表示,用 $\chi^2$ 检验;计量资料以( $\bar{x} \pm s$ )表示,两组间比较用独立样本t检验,多组比较用单因素方差分析;DEPI、CTPA及联合检查与“金标准”一致性用Kappa检验;采用受试者工作特征(ROC)曲线分析肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合对PE病情分级的诊断效能, $P<0.05$ 为有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 DEPI、CTPA及联合检查诊断PE结果比较** 86例疑似PE患者经影像学资料结合体征、实验室指标等综合判断,最终确诊PE 76例,排除PE 10例。DEPI、CTPA检查最终都确诊PE 72例,排除PE 14例;联合检查最终确诊PE 75例,排除PE 11例。DEPI、CTPA及联合检查灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值比较无统计学差异( $P>0.05$ ),但联合检查准确度高于DEPI、CTPA检查( $P<0.05$ );且联合检查诊断PE与“金标准”一致性高于DEPI、CTPA检查(Kappa值分别为0.946、0.711、0.614),见表1~2。

**2.2 不同病情分级PE患者肺栓塞指数、肺灌注缺损指数比较** 依据PESI评分将PE患者分级,其中1级20例(26.32%),2级27例(35.53%),3级19例(25.00%),4级10例(13.16%)。病情分级4级的PE患者CTPA肺栓塞指数高于1~3级患者,且3级高于1~2级,2级高于1级(均 $P<0.05$ );病情分级3~4级的PE患者DEPI肺灌注缺损指数高于1~2级患者,2级高于1级(均 $P<0.05$ ),但3级、4级之间比较差异不具有统计学意义( $P>0.05$ ),见表3。

表1 DEPI、CTPA及联合诊断PE结果比较(n)

项目		金标准		合计
		阳性	阴性	
DEPI	阳性	70	2	72
	阴性	6	8	14
	合计	76	10	86
CTPA	阳性	71	1	72
	阴性	5	9	14
	合计	76	10	86
联合	阳性	75	0	75
	阴性	1	10	11
	合计	76	10	86

表3 不同病情分级PE患者肺栓塞指数、肺灌注缺损指数比较

病情分级	n	肺栓塞指数	肺灌注缺损指数
1级	20	10.74±1.14	8.80±1.71
2级	27	22.58±3.78*	14.14±1.86*
3级	19	29.18±4.74**	17.54±3.61**
4级	10	34.17±5.96**^	18.05±3.87**
F值		107.030	43.987
P值		<0.001	<0.001

注:与1级比较,\* $P<0.05$ ;与2级比较,\*\* $P<0.05$ ;与3级比较,^^ $P<0.05$ 。

表2 DEPI、CTPA及联合诊断PE效能比较

项目	灵敏度	特异度	准确度	阳性预测值	阴性预测值	Kappa值
DEPI	92.11(70/76)	80.00(8/10)	90.70(78/86)	97.22(70/72)	57.14(8/14)	0.614
CTPA	93.42(71/76)	90.00(9/10)	93.02(80/86)	98.61(71/72)	64.29(9/14)	0.711
联合	98.68(75/76)	100.00(10/10)	98.84(86/86)**	100.00(75/75)	90.91(10/11)	0.946
$\chi^2$ 值	3.695	2.222	9.669	2.098	3.658	—
P值	0.158	0.329	0.008	0.350	0.170	—

注:与DEPI比较,\* $P<0.05$ ;与CTPA比较,\*\* $P<0.05$ 。

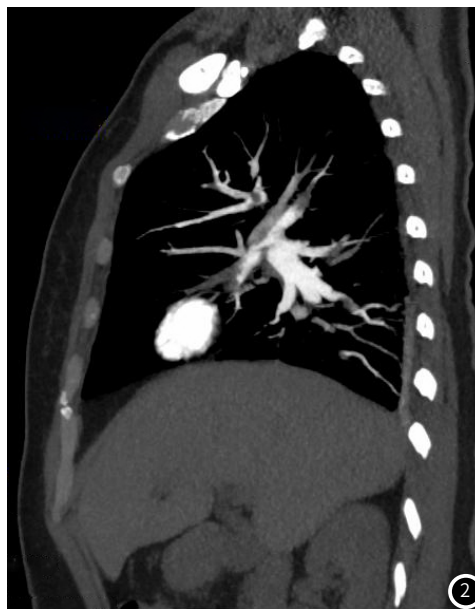
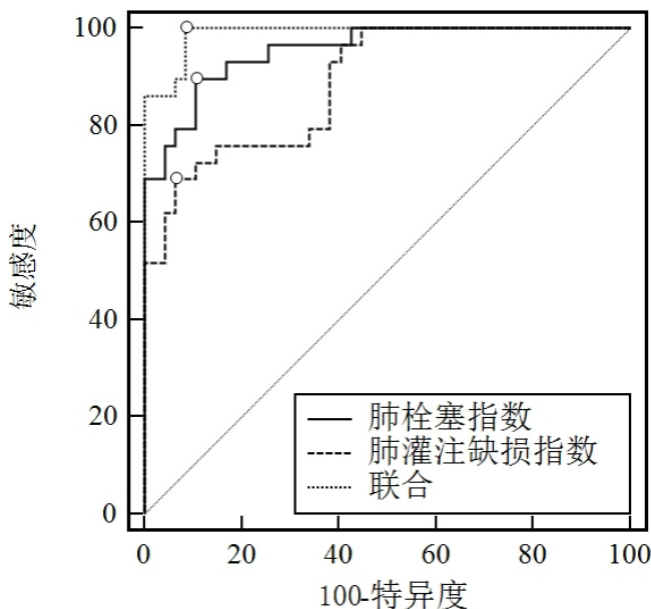
**2.3 肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合对PE病情分级的诊断效能** 将病情分级3~4级定义为病情危重, 1~2级定义为病情低中危。ROC曲线分析显示, 肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合对PE病情分级均有一定的诊断效能( $P < 0.05$ ), 其曲线下面积

(AUC)分别为0.955、0.888、0.989, 其中联合诊断效能最高, 敏感度为100.00%, 特异度为87.23%, 见表4、图1。

**2.4 典型病例影像分析** 见图2。

**表4 肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合预测病情危重的效能分析**

指标	最佳截断值	约登指数	AUC	95%CI	敏感度(%)	特异度(%)	Z值	P值
肺栓塞指数	24.93	0.790	0.955	0.881~0.989	89.66	89.36	21.306	<0.001
肺灌注缺损指数	16.36	0.626	0.888	0.795~0.949	68.97	93.62	10.447	<0.001
联合	—	0.915	0.989	0.932~1.000	100.00	87.23	65.247	<0.001



**图1** 肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合预测病情危重的效能。

**图2** 1例PE患者增强CT矢状位显示图。患者男, 68岁, 因“心慌, 胸闷, 气短, 呼吸困难”入院, 入院后行增强CT扫描提示: 肺上叶动脉主干; 右肺上叶后段、右肺中叶、右肺下叶后段动脉多发栓子形成。

### 3 讨论

PE具有致残率、致死率高的特点, 该病是因栓子通过体静脉或右心流至肺动脉, 阻塞肺动脉引起肺循环障碍, 若不及时救治, 可引起患者预后不良, 甚至死亡<sup>[11]</sup>。PE发病可累及肺组织, 引起呼吸衰竭, 若阻塞肺动脉, 则可能引起心功能衰竭, 且PE患者无特殊的临床体征, 症状的严重程度取决于患者心肺功能、栓塞部位及范围, 故而临床无法直接通过呼吸困难、胸痛等体征确诊PE以及判断疾病严重程度, 易与心脏、肺部基础疾病混淆, 出现误诊、漏诊, 导致最佳治疗时机延误, 故临床主张通过检查帮助诊断<sup>[12]</sup>。临床常用的PE诊断方法包括CT、超声等, 但CT平扫影像则会受到胸骨的干扰, 使显影质量不高, 伪影严重, 超声诊断对任何肺血管压力增高疾病均可出现阳性征象, 特异度较低, 故而均存在一定的局限性, 难于满足临床需求<sup>[13]</sup>。因此, 临床迫切需要寻求特异度、敏感度高的检查手段, 对PE进行早期、

准确的诊断, 并评估患者病情严重程度, 以争取最佳治疗时间窗及作出正确临床决策。

本研究将影像学资料结合体征、实验室指标等综合判断作为“金标准”, 发现86例疑似PE患者最终确诊PE 76例(88.37%), 排除PE 10例(11.63%)。而经DEPI、CTPA及联合检查发现, DEPI、CTPA及联合检查灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值比较无统计学差异( $P > 0.05$ ), 但联合检查准确度高于DEPI、CTPA检查( $P < 0.05$ ); 且联合检查诊断PE与“金标准”一致性高于DEPI、CTPA检查(Kappa值分别为0.946、0.711、0.614), 提示DEPI、CTPA检查在指导PE诊断中具有较高效能, 且二者联合可实现优势互补, 显著提高PE诊断准确率。随着影像技术的发展, 近年来, CTPA逐渐成为PE诊断的首选方法, 可明确发现肺动脉主干及分支血管内造影剂低密度充盈缺损情况, 从形态学上观察栓子存在部

位、范围。本次CTPA检查出现1例漏诊患者，可能与时间分辨率影响导致周围性栓塞显影不清晰有关；出现5例误诊可能与PE患者呼吸困难，患者在扫描过程中呼吸控制不理想，出现呼吸运动伪影，干扰肺动脉成像质量有关。DEPI技术是在CTPA技术上发展而来，也是近些年常用于辅助PE诊断的手段，可直观反映肺动脉血管血流灌注情况，通过灌注稀疏或缺损发现阻塞病灶血管<sup>[14]</sup>。本次DEPI检查出现2例漏诊患者，可能与栓塞后血管损伤，而侧支循环代偿导致血流灌注未发生较大改变有关；出现6例误诊可能与PE患者检查时采取仰卧位，血液循环改变，导致下肢血液循环减缓，造影剂残留，肺部造影剂灌注缺损也随之出现有关，也可能与DEPI无法观察血管壁与血管腔，对其他疾病引起的肺灌注异常无法识别，出现假阳性有关。上述问题对PE诊断带来较大不确定性，无法满足临床需求，而将CTPA、与DEPI联合，则即可准确定位栓塞血管并显示血管壁与血管腔，还可直接反映栓塞血管远端血流灌注情况，获得形态学、功能学两种信息，便于从多角度、多方位了解肺动脉栓塞情况，提高临床诊断准确度<sup>[15]</sup>。

此外，依据PESI评分将PE患者分级，其中1级20例(26.32%)，2级27例(35.53%)，3级19例(25.00%)，4级10例(13.16%)，对不同病情分级患者CTPA肺栓塞指数、DEPI肺灌注缺损指数比较发现，1~4级PE患者CTPA肺栓塞指数依次增高(均 $P<0.05$ )，1~3级PE患者DEPI肺灌注缺损指数高依次增高(均 $P<0.05$ )，但3级、4级之间比较差异不具有统计学意义( $P>0.05$ )。而后将CTPA肺栓塞指数、DEPI肺灌注缺损指数纳入ROC曲线分析显示肺栓塞指数、肺灌注缺损指数以及联合对PE病情分级均有一定的诊断效能( $P<0.05$ )，其曲线下面积(AUC)分别为0.955、0.888、0.989，其中联合诊断效能最高，敏感度为100.00%，特异度为87.23%。提示DEPI、CTPA检查均可指导PE患者病情分级，但二者联合诊断效能更高。CTPA肺栓塞指数可客观反映肺动脉栓塞程度，EPI肺灌注缺损指数则可客观反映病灶肺动脉内血流灌注降低或缺损程度，均可量化评估肺动脉栓塞程度<sup>[16]</sup>。病情分级越高、病情越危重的PE患者肺动脉栓塞程度越重，则也可发现其CTPA肺栓塞指数、DEPI肺灌注缺损指数均越高<sup>[17]</sup>。但龚军伟等<sup>[18]</sup>研究也发现CTPA在周围性阻塞中敏感度较低，是由于时间、空间分辨率较低导致，而DEPI在中央型阻塞中敏感度较低，是由于中央型血管管腔较大，阻塞对血流灌注影响较小导致，与本研究结果相符合。而联合DEPI、CTPA检查可互相弥补不足之处，互为补充，显著提高对肺动脉栓塞的识别敏感度，帮助评估病情分级。

综上所述，DEPI、CTPA检查在指导PE诊断及病情分级中具有较高效能，且二者联合可实现优势互补，显著提高PE诊断准确率与病情分级效能。

## 参考文献

- [1] 孙森, 张昕旸, 张金玲. 急性非高危肺栓塞患者的临床、影像及风险分层特征分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22(3): 58-60, 67.
- [2] Oh JK, Park JH. Role of echocardiography in acute pulmonary embolism[J]. Korean J Intern Med, 2023, 38(4): 456-470.
- [3] Machanahalli Balakrishna A, Reddi V, Belford PM, et al. Intermediate-risk pulmonary embolism: a review of contemporary diagnosis, risk stratification and management[J]. Medicina (Kaunas), 2022, 58(9): 1186.
- [4] Zantonelli G, Cozzi D, Bindi A, et al. Acute pulmonary embolism: prognostic role of computed tomography pulmonary angiography (CTPA) [J]. Tomography, 2022, 8(1): 529-539.
- [5] Hu H, Xie P, Li C, et al. Evaluation of CT angiography obstruction score and pulmonary perfusion defect score using the third-generation dual-source CT for pulmonary embolism[J]. Clin Radiol, 2023, 78(9): e627-e634.
- [6] 项行林, 徐红维, 张英, 等. CT肺血管造影和肺血管灌注成像对肺栓塞患者的诊断价值[J]. 血栓与止血学, 2022, 28(3): 958-959, 962.
- [7] 黎勇, 周毅, 杨弟春, 等. 肺CTPA联合D-二聚体检测对急诊肺栓塞的诊断研究[J]. 影像科学与光化学, 2022, 40(5): 1221-1225.
- [8] 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.
- [9] 韩茹苑. 肺栓塞指数、肺灌注缺损指数联合PESI评分对急性肺栓塞严重程度及预后的评估价值[D]. 内蒙古医科大学, 2022.
- [10] 王渝胜, 王华蕊, 朱玲. sPESI联合RDW和NLR对急性非高危肺栓塞患者预后的预测价值[J]. 中国急救医学, 2021, 41(4): 302-306.
- [11] Kulka HC, Zeller A, Fornaro J, et al. Acute pulmonary embolism—its diagnosis and treatment from a multidisciplinary viewpoint[J]. Dtsch Arztebl Int, 2021, 118(37): 618-628.
- [12] Palm V, Rengier F, Rajiah P, et al. Acute pulmonary embolism: imaging techniques, findings, endovascular treatment and differential diagnoses[J]. Rofo, 2020, 192(1): 38-49.
- [13] 吴应龙. 双能CT肺灌注成像与CT肺动脉造影对急性肺栓塞临床危险分层的比较[D]. 吉林: 吉林大学, 2022.
- [14] 万泽安, 谈伍平, 苗贵华, 等. 应用双源CT双能量肺灌注成像评估急性肺栓塞患者病情程度及右心功能的可行性分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(8): 77-78, 100.
- [15] 郭华. 老年肺栓塞患者溶栓治疗后CT肺动脉造影及CT肺灌注成像参数变化及意义[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2022, 36(1): 64-67.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 龚军伟, 李琦, 陈虹. 肺血栓栓塞症CT肺动脉造影检查技术及优化策略[J]. 中国实用内科杂志, 2021, 41(6): 493-497.

(收稿日期: 2024-12-27) (校对: 姚丽娜 排版: 张鸿燊)