

基于 CT 肺血管成像肺栓塞人工智能检测效能的临床研究

张会阳, 李翔, 杨欣, 王翔

【摘要】 目的:评估肺栓塞人工智能(AI)软件对肺动脉血栓的检测效能。**方法:**回顾性分析本院医学影像科诊断的 38 例肺栓塞患者的胸部 CT 肺血管成像(CTPA)图像。AI 软件独立阅片后将 38 例患者随机分为 A、B 两组,一组由初、中级医师阅片,一组由初、中级医师联合 AI 阅片,将 3 位高级职称影像医师阅片结果作为诊断标准,比较不同模式下肺栓塞的诊断时效性和符合率。**结果:**AI 软件对肺栓塞的诊断灵敏度、特异度与肺动脉分支等级呈负相关,1~3 级动脉分支血栓的诊断灵敏度均为 100%,4~6 级及以上分支血栓的灵敏度分别为 92.05%、91.46%、83.33%;1~2 级动脉分支血栓的诊断特异度均为 100%,3~6 级及以上分支血栓的特异度分别为 97.5%、96.43%、96.15%、96.15%。初、中级医师在 AI 辅助下的诊断灵敏度(分别为 76.98%、92.85%)和特异度(分别为 89.81%、97.50%)均优于人工阅片(灵敏度分别为 62.42%、79.61%,特异度分别为 79.67%、88.65%)。人工阅片联合 AI 可减少阅片时间,且中级医师联合 AI 模式的诊断灵敏度和特异度最高(分别为 92.85%、97.50%),并显著减少阅片时间($P<0.001$)。**结论:**肺栓塞 AI 软件可以提高放射科医师诊断肺栓塞的灵敏度、特异度,同时缩短阅片时间,可作为临床有效的 AI 辅助工具。

【关键词】 肺栓塞;人工智能;CT 肺血管成像;体层摄影术,X 线计算机;诊断效能;灵敏度;特异度

【中图分类号】 R563.5;R816.41 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)09-1166-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.09.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Clinical study on the efficacy of artificial intelligence detection for pulmonary embolism based on CTPA**

ZHANG Hui-yang, LI Xiang, YANG Xin, et al. School of Medicine, Jiangnan University, Wuhan 430056, China

【Abstract】 Objective: To evaluate the efficacy of artificial intelligence (AI) software in detecting pulmonary embolism (PE). **Methods:** We retrospectively analyzed chest CT pulmonary angiography (CTPA) images of 38 patients diagnosed with pulmonary embolism in the Medical Imaging Department of our hospital. After independent image review by AI software, 38 patients were randomly divided into two groups: Group A was reviewed by junior and intermediate-level physicians, and Group B was reviewed by junior and intermediate-level physicians with the assistance of AI. The diagnostic results from three senior radiologists served as the gold standard for comparing the diagnostic timeliness and accuracy of PE between different review modes. **Results:** The sensitivity and specificity of the AI software in detecting pulmonary embolism were negatively correlated with the level of the pulmonary artery branch. For arterial branches of levels 1~3, the diagnostic sensitivity was 100%, while the sensitivity was 92.05%, 91.46%, and 83.33%, respectively, for levels 4, 5, 6, and above branches. The specificity for levels 1~2 branches was 100%, and for levels 3, 4, 5, 6, and above branches, the specificity was 97.5%, 96.43%, 96.15%, and 96.15%, respectively. The diagnostic sensitivity (76.98%, 92.85%) and specificity (89.81%, 97.50%) of the junior and intermediate-level physicians assisted by AI were superior to those of manual review alone (62.42%, 79.61% sensitivity and 79.67%, 88.65% specificity). AI-assisted review reduced the reading time, and the highest diagnostic sensitivity and spe-

作者单位: 430056 武汉, 江汉大学医学部(张会阳); 430014 武汉, 华中科技大学同济医学院附属武汉中心医院影像科(李翔、王翔); 430074 武汉, 华中科技大学电子信息与通信学院(杨欣)

作者简介: 张会阳(1998-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事呼吸系统影像诊断工作。

通讯作者: 李翔, E-mail: 11858667@qq.com

基金项目: 中华国际医学交流基金会-SKY 影像科研基金(基金编号: Z-2014-07-1912); 湖北省科学技术厅自然科学基金一般项目(基金编号: 2019CFB652)。

cificity were observed with intermediate-level physicians assisted by AI (92.85% and 97.50%, respectively), with a significant reduction in reading time ($P < 0.001$). **Conclusion:** AI software for pulmonary embolism can improve the sensitivity and specificity of radiologists in diagnosing pulmonary embolism while shortening the reading time, and can be used as an effective AI-assisted tool in clinical practice.

【Key words】 Pulmonary embolism; Artificial intelligence; Computed tomography pulmonary angiography; Tomography, X-ray computed; Effectiveness of the diagnosis; Sensitivity; Specificity

肺动脉栓塞(pulmonary embolism, PE)是世界上最常见的急性心血管综合征之一,每 10 万人中约有 39~115 人发病^[1],若不及时诊断与治疗,死亡率可高达 20%~30%,仅次于肿瘤及心肌梗死^[2]。肺栓塞的发生很迅速且无法预测,具有低诊断符合率、高发病率及高死亡率的特点,因此早期诊断肺栓塞,把握黄金时间实施对肺栓塞的早期治疗非常必要,可以大大降低致死率。肺栓塞的诊断非常困难,一直以来肺动脉造影被认为是肺栓塞诊断的“金标准”^[3,4],但肺动脉造影为有创性检查,有发生严重并发症的可能,不适合作为首选检查^[5]。相比之下,CT 肺血管成像(computed tomography pulmonary angiography, CTPA)可清晰显示肺动脉内栓子的形态、部位、大小及与肺动脉的关系,还可显示肺部解剖结构及血流情况,通过分析还可获得反映肺动脉阻塞部位和阻塞程度的量化指标,如肺动脉栓塞指数^[6],后期也可进行三维重建,对于确定和排除 PE 具有重要作用,因此 CTPA 是可疑 PE 患者的首选诊断成像技术^[6]。

人工智能(artificial intelligence, AI)作为一种图像定量分析技术,已被广泛应用于医学图像分析领域^[7]。在 AI 应用于医学影像诊断的背景下,基于深度学习(deep learning, DL)的 CT 图像重建算法逐步应用于临床实践^[8],它在 PE 患者 CTPA 中的应用是通过卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)对栓子特征进行识别与提取,在计算机视觉辅助分割肺动脉的基础上对栓子进行定性定量分析^[9]。在 PE 患者的 CTPA 图像中,由于图像太多,放射科医师需要视觉追踪肺动脉才能发现肺栓子,这种方法太过费时费力,且容易受主观因素的影响。AI 辅助诊断肺栓子会受到肺动静脉密度差异、对比剂流动伪影和患者呼吸运动等因素影响,导致图像伪影和噪声增加^[10]。前期国内研究表明基于 CTPA 的 AI 辅助诊断 PE 具有良好的检出精准度^[11],本研究将进一步评估肺栓塞 AI 临床场景应用下的检测效能。通过比较人工阅片与人工阅片联合 AI 场景下肺栓塞的检出情况,从而评价有无 AI 辅助软件下放射科医师诊断肺栓塞的准确率和效率,评估 AI 软件对肺动脉血栓的检测效能。

材料与方法

1. 病例资料

回顾性分析 2023 年 2—4 月华中科技大学同济医学院附属武汉市中心医院医学影像科确诊的 38 例肺栓塞患者的胸部 CTPA 图像。病例纳入标准:①经我院医学影像诊断科确诊为肺动脉栓塞;②PACS 系统中影像学资料完整;③图像质量清晰。病例排除标准:①AI 软件中未保存影像学资料;②AI 软件无法对肺栓塞的影像数据进行计算;③运动伪影重,图像质量太差导致无法明确诊断;④3 位副主任或以上级别医师讨论仍无法确诊的病例。将入组患者匿名处理后按照随机数字表法分为 A 组(医师组,19 例)和 B 组(医师联合 AI 组,19 例),以用于对照读片设计。A、B 两组患者的年龄、性别差异均无统计学意义($P > 0.05$, 表 1)。本研究已通过我院伦理委员会审核批准通过[编号:院伦函 2020(03)号]。

2. 检查方法

所有入组患者 CT 检查均采用 Philips 256 层螺旋 CT 机(Philips, Best, 荷兰),扫描参数:探测器 0.5×128 层,管电压 120 kV,管电流 300~350 mAs,扫描时间 6.5~8.0 s,视野 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,采集矩阵 512×512 ,层厚 0.5~1.0 mm。增强扫描对比剂采用碘乙醇(370 mg I/mL),以 4.0~4.5 mL/s 流率采用 Ante 双管高压注射器(中国深圳安特哥实业有限公司)注射对比剂 60~70 mL,然后使用 Surestart 智能触发器以相同流率注射 30 mL 生理盐水(触发阈值为 90~100 HU)。扫描范围为肺尖到肺底,采集肺动脉期 CT-PA 图像。

3. 图像分析

采用 3 种方式对图像进行分析和诊断。对 A 组患者采用单纯人工阅片(artificial reading, AR):由 1 位从事影像诊断的住院医师作为初级医师组、1 位从事胸部 CT 诊断工作满 5 年的主治医师作为中级医师组,分别采用双盲法对 A 组 19 例患者的胸部 CTA 图像进行一次独立诊断;记录检出血栓栓子的时间、位置和数目。对 B 组患者采用 AI 辅助医师阅片:由肺栓塞人工智能检出软件辅助 A 组中的住院医师作为初级医师联合 AI 组、辅助 A 组中主治医师作为中级医

师联合 AI 组,分别使用双盲法对 B 组 19 例患者的胸部 CTA 图像进行一次诊断;记录检出血栓栓子的时间、位置和数目。对所有患者单独使用 AI 肺栓塞检出软件阅片;本研究中肺栓塞 AI 检出软件使用的是联影智能诊断软件,将 38 例患者的肺栓塞 CTPA 图像传入联影智能诊断软件中,该软件可自动标记疑似血栓栓子的部位,于右侧栏目内显示栓子分布位置、体积、血管是否完全闭塞等信息,整理收集 AI 软件中计算出的栓子的位置和数目。将 AI 组检出的结果按照肺血栓栓子所在血管分支等级分为 6 组,将 1 级定为肺动脉主干,2 级为左右肺动脉干,3 级为肺叶动脉,4 级为肺段动脉,5 级为肺段亚段动脉,6 级以上为肺段亚段下一级以及更细分支动脉。

由 3 位副高及以上级别影像科专业医师对原始 CTPA 图像进行分析,肺栓塞的 CTPA 影像学特征表现为肺动脉血管腔内的充盈缺损^[12],可表现为中心性、偏心性和完全性。将他们的阅片结果作为诊断“金标准”,意见不一致时,3 位医师可投票决定,得出最终结论。

4.观察与评价指标

灵敏度和特异度:将 A 组初、中级医师检出肺血栓栓子的结果、B 组初、中级医师联合 AI 检出肺血栓栓子的结果、单独采用 AI 软件检出肺血栓栓子的结果与金标准进行比较,以上各种方式检出栓子若与金标准检出栓子的数目、肺动脉血管分级位置一样即可认为相符。采用灵敏度和特异度来比较这 5 种方式检出血栓的结果,灵敏度可衡量该诊断方法是否准确识别到肺栓子,特异度可检验该诊断方法是否准确排除掉肺栓子。检测方法的灵敏度越高,特异度越高,该检测方法的性能越好^[13]。

检出准确性(符合率):单独使用 AI 软件阅片的

结果已经按照肺血栓栓子所在血管分支等级分为 3 组,可比较 AI 软件识别不同等级分支肺动脉血管内肺血栓栓子的结果符合率。

阅片时间:将 A 组初、中级医师识别肺栓塞的时间与 B 组初、中级医师联合 AI 识别肺栓塞的时间进行比较。

5.统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件进行统计学分析。计数资料以例(%)表示,计量资料符合正态分布者以均值±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,不符合正态分布者以中位数和四分位数间距 M(P25,P75)表示。连续变量符合正态分布者采用 t 检验进行组间比较,不符合正态分布者采用非参数检验;分类变量的组间比较采用卡方检验。将 AI 软件、初中级医师、初中级医师+AI 的检出结果与金标准进行比较,并比较医师加 AI 辅助前后的阅片时间。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1.专家阅片结果

3 位副高及以上级别专家分析 38 例已确诊肺栓塞患者的影像学资料,确定了 283 个血栓栓子,其中 1~2 级肺动脉血管存在栓子 14 个,3~4 级肺动脉血管存在栓子 127 个,5 级及以上肺动脉血管存在栓子 142 个。

2.AI 肺栓塞检出软件阅片结果

将所有患者影像学图像导入联影智能软件中运行计算,所得结果与金标准进行比较。AI 软件实际检出血栓栓子共 268 个,其中 259 个血栓栓子与金标准结果相符,并按照血管分级情况与金标准进行对比(表 2)。结果显示 AI 软件检测肺血栓的灵敏度、特异度和符合率较高,而且随着肺动脉分支等级的增加,AI

表 1 两组患者基本资料比较

指标	入组病例	A 组	B 组	统计量	P 值
病例数(例)	38	19	19		
年龄(岁)[M(P25,P75)]	71.5(60,78.25)	70(60,74)	74(60,81)	Z=0.965	0.34
年龄范围(岁)	32~90	39~90	32~87		
性别(n,%)				—	1
男	25(65.79)	12(63.16)	13(68.42)		
女	13(34.21)	7(36.84)	6(31.58)		

表 2 肺栓塞 AI 软件识别肺动脉血栓栓子情况对比

血管分级	金标准 PE 数	AI 检出 PE 数	AI 正确 检出数	灵敏度 (%)	特异度 (%)	假阳性率 (%)	假阴性率 (%)	符合率 (%)
1 级	1	1	1	100.00	100.00	0	0	100.00
2 级	13	13	13	100.00	100.00	0	0	100.00
3 级	39	40	39	100.00	97.50	2.50	0	97.50
4 级	88	84	81	92.05	96.43	3.57	7.95	89.01
5 级	82	78	75	91.46	96.15	3.85	8.54	88.23
6 级及以上	60	52	50	83.33	96.15	3.85	16.67	80.65
总数	283	268	259	91.52	96.64	3.36	8.48	88.70

检测的灵敏度、特异度和符合率降低,假阳性率、假阴性率增高。

3.初、中级医师组及初、中级医师联合 AI 组的阅片结果

在 A 组患者图像中初级医师检出了 123 个肺血栓栓子,其中 98 个与金标准相符,中级医师检出了 141 个肺血栓栓子,其中 125 个与金标准符合;在 B 组患者图像中初级医师+AI 组检出了 108 个肺血栓栓子,与金标准相符的有 97 个,中级医师+AI 组检出了 120 个肺血栓栓子,与金标准相符的有 117 个。

4.肺血栓栓子检出效能评价

将肺栓塞 AI 软件、初中级医师及初中级医师+AI 的阅片结果与金标准结果进行比较,分别计算以上几种方式在检测肺栓塞患者的肺血栓栓子时的灵敏度和特异度。结果显示单独用肺栓塞 AI 软件检出肺血栓栓子的灵敏度和特异度均高于初、中级医师单独诊断(表 3)。当 AI 辅助医师时,医师需要看软件中图像和原始图像,需要两者对比检查软件提示的肺血栓是否与原始图像相符合,是否出现误检,更要检查不提示有肺血栓的血管,看是否有遗漏。我们发现,当 AI 辅助医师检测肺栓塞时,这种模式下检出肺血栓栓子的灵敏度和特异度也高于单独医师诊断,而且中级医师在 AI 软件的辅助下检出肺血栓栓子的灵敏度和特异度均高于单独 AI 软件诊断(灵敏度分别为 92.85%、91.52%,特异度分别为 97.50%、96.64%)。

表 3 肺栓塞 AI 软件、初中级医师、初中级医师+AI 的诊断血栓结果

指标	AI 组	初级 医师组	中级 医师组	初级医师 +AI 组	中级医师 +AI 组
灵敏度	91.52%	62.42%	79.61%	76.98%	92.85%
特异度	96.64%	79.67%	88.65%	89.81%	97.50%

5.阅片时间比较

比较初、中级医师组与初、中级医师+AI 组的平均阅片时间,结果显示初级医师在 AI 辅助下的平均阅片时间为(542.95±55.31)s,初级医师的平均阅片时间为(631.74±93.65)s,初级医师+AI 组的平均阅片时间明显低于初级医师组,差异有统计学意义($t=3.558, P=0.001$)。中级医师+AI 组的平均阅片时间为(364.52±49.47)s,中级医师组的平均阅片时间为(514.73±63.54)s,中级医师+AI 组的平均阅片时间明显低于中级医师组,差异有统计学意义($t=8.130, P<0.001$)。

6.AI 软件识别肺血栓的结果比较

肺栓塞 AI 软件可描绘出肺动脉的轮廓,并标红肺栓塞病灶区域,在右侧列表中也可以显示出血栓具体信息。根据智能软件对肺栓塞的检测结果,可将其分为三类:①准确识别血栓,AI 识别到的血栓和原始图像中人工识别血栓一致(图 1);②未识别到血栓,按

照金标准和人工识别原始图像该位置有血栓,但 AI 未识别出来(图 2);③错误识别血栓,按照金标准和人工识别原始图像该位置无血栓,但是 AI 却识别出血栓(图 3)。

讨 论

目前,CTPA 作为临床诊断肺栓塞的首选影像学检查方法^[14-16],具有对血栓显示的高灵敏性和高特异性。早期单层 CT 对不同等级分支肺动脉的肺栓塞病灶的检出灵敏度变化范围较大(67%~100%)^[17],而且由于扫描方法及对比剂注射方案的影响,肺动脉强化不佳的现象时有发生,容易出现漏诊和误诊,严重时甚至无法满足诊断要求^[18]。随着 CT 设备的更新换代,较薄的准直和层厚增加了医师的阅片难度,仅凭放射科医师的视觉追踪有一定的漏诊率^[19]。

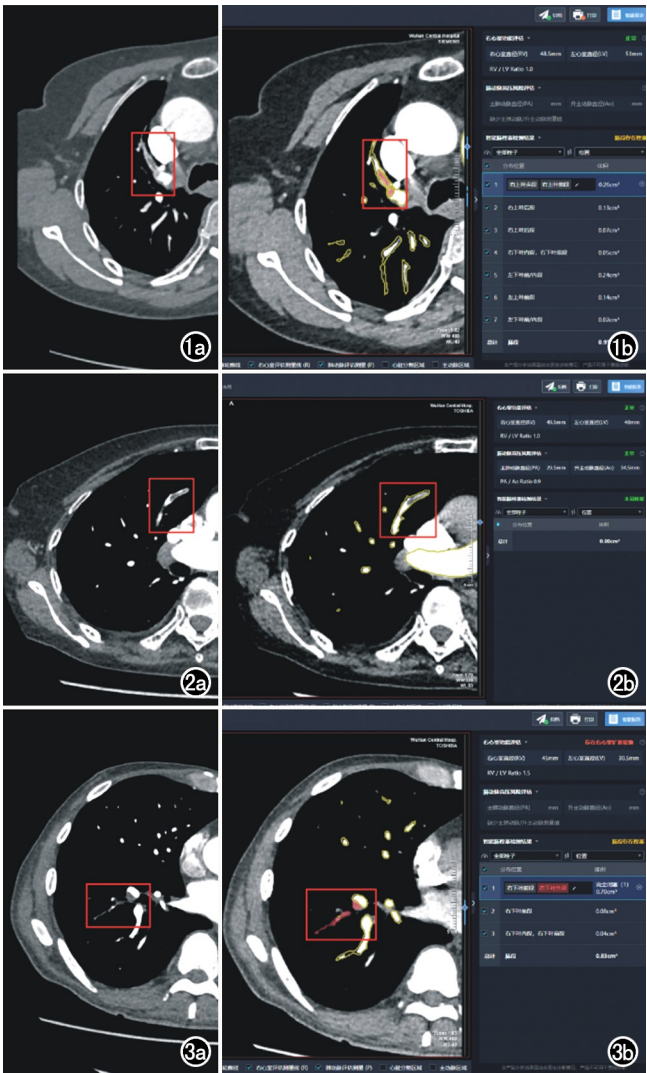


图 1 a)原始图像可见血栓;b)AI 精准识别到血栓。
图 2 a)原始图像可见血栓;b)AI 未识别到血栓(漏诊)。
图 3 a)原始图像中低密度为肺动脉伴行的肺静脉,不是血栓;b)AI 错误识别为血栓(误诊)。

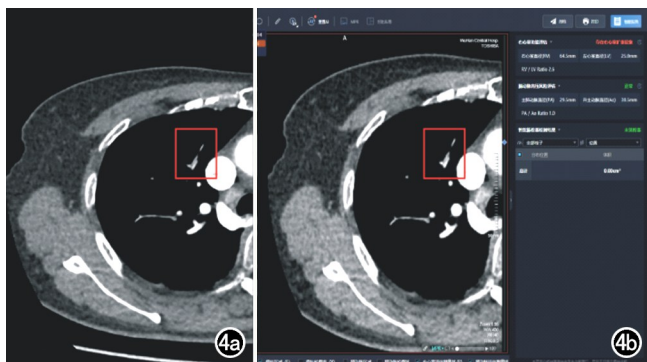


图 4 a)原始图像存在血栓;b)AI 未识别为血栓(漏诊)。

人工智能和深度学习理论技术近年来有了很大的发展,尤其是在医学图像领域取得了突破性的进展^[20],比如对肺结节、骨折、乳腺均有较高的检测率^[21-23]。AI 技术近年来在血管成像方面也有一定进展,前期研究结果表明,基于深度学习的肺血管分割和肺动静脉分离技术对肺栓塞病灶的提取具有良好的可持续性和可操作性^[21,24-26]。目前人工智能肺栓塞检测软件已开始应用于临床,但在检测敏感性和准确性上仍存在问题。本研究将肺栓塞 AI 辅助软件与放射科医师人工判读进行对比,比较不同临床模式对肺栓塞检出的效能,通过选取不同层级放射科医师在有无 AI 辅助下的工作环境来分别阅片,比较其诊断的准确率和时效性,研究新型肺栓塞 AI 检测软件是否能帮助放射科医生提高肺栓塞的临床诊断效能。

Stein 等^[27]对一定数量的肺栓塞患者进行研究时采用人工阅片的方式诊断 PE,取得了 83% 的灵敏度和 96% 的特异度,本研究中肺栓塞 AI 软件的诊断灵敏度和特异度分别为 91.52% 和 96.64%,从数据对比来看 AI 独立检测肺栓塞的检出率要高于人工阅片;但在不同肺动脉分支检出血栓的灵敏度方面有较大差异,随着血管分级的增加,分支血管管径逐渐变细,血栓也越来越小,AI 软件的识别难度也在增加,漏检率增高,即 AI 检出血栓符合率与血管分级呈负相关。本研究结果显示,对于管径较粗的肺动脉(1 级和 2 级肺动脉),AI 检出的灵敏度和符合率都为 100%,随着血管分支等级的增加,检出的灵敏度和符合率也逐渐降低,1~3 级血管检出的灵敏度均为 100%,4 级血管为 92.05%,5 级血管为 91.46%,6 级及以上血管为 83.33%;1~2 级血管检出的符合率均为 100%,3 级血管为 97.5%,4 级血管为 89.01%,5 级血管为 88.23%,6 级及以上血管为 83.33%。

笔者发现越小亚段的血栓往往骑跨在血管分叉处,因为其大部分是上级血管内血栓的延续,这时 AI 容易误诊或漏诊。本组 1 例 AI 提示右肺第 4 级分支

血管内存在血栓,因为将肺动脉伴行的肺静脉误认为血栓,其密度与血栓密度相似,出现了假阳性(图 3)。本组另 1 例右肺第 5 级分支血管血栓 AI 未识别,因为该血栓横跨两级血管,出现远侧更小分支动脉的假阴性(图 4)。以上两种情况是 AI 检测肺栓塞出现误诊和漏诊的最常见原因。

本研究中 A、B 两组患者的年龄、性别差异均无统计学意义($P>0.05$),可以进行比较。为了在真实临床情况中采用随机双盲的方法研究 AI 辅助软件的检出效能,将患者和不同层级诊断医师进行随机分组,比较人工判读和人工联合 AI 诊断两种方法,统计不同诊断模式下的检测结果和检测时间。

初、中两级医师对图像进行分析时,阅片经验、CTPA 技术的条件、栓子的特征等多种因素会影响他们的判读结果。本研究结果显示,中级医师组诊断肺栓塞的灵敏度和特异度均高于初级医师组(灵敏度分别为 79.61%、62.42%,特异度分别为 88.65%、79.67%),中级医师从事胸部影像诊断时间至少 5 年,诊断经验要比初级医师丰富的多,而且受患者的屏气状态、对比剂注射时间和剂量、药物浓度等因素影响,图像的伪影和噪声增加,给医师的诊断带来一定困难。其次,有的孤立性小动脉分支血栓位于肺动脉远端不易被人眼发现;有的肺动脉血栓与其伴行的肺静脉、淋巴结密度相似,干扰医师的正确识别。

在人工阅片联合 AI 的场景下,笔者发现在 AI 的帮助下,医师诊断肺血栓的灵敏度和特异度都明显提高。尤其是中级医师联合 AI,其灵敏度和特异度都高于 AI 软件独立检测(灵敏度分别为 92.85%、91.52%,特异度分别为 97.50%、96.64%),说明中级医师联合 AI 的模式可以取得更高的检测效能。

本研究结果显示,AI 辅助初级医师和中级医师时,平均阅片时间都短于人工阅片,且差异均有统计学意义(P 均 ≤ 0.001)。笔者发现对肺部 CTA 图像进行阅片时,医师人工判读时间并不与栓子数量成正比,因为在双盲情况下,对每例患者的图像均需要大量时间。本研究结果发现,中级医师联合 AI 组对于肺栓塞的检测具有更高的效能,既能提高诊断准确性,而且明显减少阅片时间。人工智能肺栓塞辅助软件的应用能很好地为临床医生服务,具有良好的重复性和可操作性,在临床应用中大大缩短诊断时间,提高诊断准确性。

本研究具有以下局限性:①样本量有限,如能在增加样本量的同时进行前瞻性研究将更有说服力^[28];②本研究主要评价 AI 软件辅助放射科医师检出肺血栓的效能(时效性和精准度),并没有对肺血栓栓子的大小、对血管的堵塞程度进行评价,之后我们会将这些影响因素也纳入整体评估。

综上所述,肺栓塞 AI 软件可以提高放射科医师检出肺栓塞的灵敏度、特异度,同时缩短阅片时间,有效提高对肺栓塞的诊断效能,提供更准确的诊疗信息,为临床开展救治提供了重要依据,肺栓塞人工智能 AI 软件可以作为有效的辅助工具应用于临床。

志谢:本研究受基于 CT 肺动脉成像肺栓塞的人工智能诊断课题(编号:2019CFB652)及联影医疗 AI 的支持。

参考文献:

- [1] Cheikh AB, Gorincour G, Nivet H, et al. How artificial intelligence improves radiological interpretation in suspected pulmonary embolism[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(9): 5831-5842.
- [2] Chen F, Shen Y, Zhu X, et al. Comparison between CT and MRI in the assessment of pulmonary embolism: A meta-analysis[J]. *Medicine*, 2017, 96(52): e8935.
- [3] Galie N, McLaughlin VV, Rubin LJ, et al. An overview of the 6th World Symposium on Pulmonary Hypertension[J]. *Eur Respir J*, 2019, 53(1): 1802148.
- [4] 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) The Task Force for the diagnosis and management of acute pulmonary embolism of the European Society of Cardiology (ESC)[J]. *Eur Respir J*, 2019, 54(3): 1901647.
- [5] 王晨, 刘文燕, 朱丽娟. CTA 后期三维重建与 DSA 对老年肺栓塞的诊断价值对照研究[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2022(7): 73-74, 91.
- [6] 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.
- [7] Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, et al. Artificial intelligence in radiology[J]. *Nat Rev Cancer*, 2018, 18(8): 500-510.
- [8] 张卓璐, 陈菁, 刘卓, 等. 深度学习重建算法对肺部 CT 定量分析及图像质量的影响[J]. *放射学实践*, 2023, 38(4): 434-440.
- [9] Soffer S, Klang E, Shimon O, et al. Deep learning for pulmonary embolism detection on computed tomography pulmonary angiogram: a systematic review and meta-analysis[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 15814.
- [10] 张昕旻, 张金玲. 人工智能与深度学习在肺栓塞 CT 成像中的研究进展[J]. *临床放射学杂志*, 2022, 41(9): 1796-1798.
- [11] Li X, Wang X, Yang X, et al. Preliminary study on artificial intelligence diagnosis of pulmonary embolism based on computer in-depth study[J]. *Ann Transl Med*, 2021, 9(10): 838.
- [12] 郑浩, 季颖群. 慢性血栓栓塞性肺疾病与慢性血栓栓塞性肺动脉高压[J]. *中国实用内科杂志*, 2022, 42(12): 973-977.
- [13] Dziak JJ, Coffman DL, Lanza ST, et al. Sensitivity and specificity of information criteria[J]. *Brief Bioinform*, 2020, 21(2): 553-565.
- [14] British Thoracic Society Standards of Care Committee Pulmonary Embolism Guideline Development Group. British Thoracic Society guidelines for the management of suspected acute pulmonary embolism[J]. *Thorax*, 2003, 58(6): 470-483.
- [15] Stein PD, Woodard PK, Weg JG, et al. Diagnostic pathways in acute pulmonary embolism: recommendations of the PIOPEP II Investigators[J]. *Radiology*, 2007, 242(1): 15-21.
- [16] Wildberger JE, Mahnken AH, Das M, et al. CT imaging in acute pulmonary embolism: diagnostic strategies[J]. *Eur Radiol*, 2005, 15(5): 919-929.
- [17] Garg K, Welsh CH, Feyerabend AJ, et al. Pulmonary embolism: diagnosis with spiral CT and ventilation-perfusion scanning-correlation with pulmonary angiographic results or clinical outcome[J]. *Radiology*, 1998, 208(1): 201-208.
- [18] 黄书然, 姜鑫, 王洪杰, 等. 平静呼吸轻屏气在改善肺动脉 CT 强化效果中的应用研究[J]. *放射学实践*, 2022, 37(2): 186-190.
- [19] le Gal G, Righini M, Parent F, et al. Diagnosis and management of subsegmental pulmonary embolism[J]. *J Thromb Haemost*, 2006, 4(4): 724-731.
- [20] 刘雨柔, 南岩东, 王在强, 等. 人工智能在肺结节 CT 检测和诊断中的研究进展[J]. *中华肺部疾病杂志(电子版)*, 2021, 14(6): 833-836.
- [21] Aerts HJ, Velazquez ER, Leijenaar RT, et al. Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach[J]. *Nat Commun*, 2014, 5(1): 4006.
- [22] 崔雍浩, 商聪, 陈镡奇, 等. 人工智能综述: AI 的发展[J]. *无线电通信技术*, 2019, 45(3): 225-231.
- [23] 张娴, 刘玉林, 高智勇. 深度学习在医学影像中的应用研究进展[J]. *临床放射学杂志*, 2021, 40(10): 2041-2044.
- [24] Fink MA, Mayer VL, Schneider T, et al. CT angiography clot burden score from data mining of structured reports for pulmonary embolism[J]. *Radiology*, 2022, 302(1): 175-184.
- [25] Weikert T, Winkel DJ, Bremerich J, et al. Automated detection of pulmonary embolism in CT pulmonary angiograms using an AI-powered algorithm[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(12): 6545-6553.
- [26] Remy-Jardin M, Faivre J, Kaergel R, et al. Machine learning and deep neural network applications in the thorax: pulmonary embolism, chronic thromboembolic pulmonary hypertension, aorta, and chronic obstructive pulmonary disease[J]. *J Thorac Imaging*, 2020, 35(Suppl 1): S40-S48.
- [27] Stein PD, Fowler SE, Goodman LR, et al. Multidetector computed tomography for acute pulmonary embolism[J]. *N Engl J Med*, 2006, 354(22): 2317-2327.
- [28] Engelke C, Schmidt S, Auer F, et al. Does computer-assisted detection of pulmonary emboli enhance severity assessment and risk stratification in acute pulmonary embolism? [J]. *Clin Radiol*, 2010, 65(2): 137-144.

(收稿日期: 2023-06-21 修回日期: 2023-12-14)