

急性肺栓塞 CT 成像的研究进展

林竹潇 综述 张龙江, 陈燕, 卢光明 审校

【摘要】 急性肺栓塞是最常见的心血管疾病之一。CT 肺动脉成像是目前临床上诊断急性肺栓塞首选的影像检查方法,具有非侵入性、快速、特异度高、敏感度高等优点。近年来,CT 肺动脉成像的过度使用及辐射剂量等引起了广泛关注。本文主要对急性肺栓塞的诊断、危险分级的方法及 CT 肺动脉成像技术的进展等进行综述。

【关键词】 急性肺栓塞; 双能量 CT; 体层摄影术, X 线计算机; 血管造影术; 辐射剂量

【中图分类号】 R563.5; R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2016)09-0846-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2016.09.011

急性肺栓塞是最常见的心血管疾病之一,发病率为 0.1%,仅次于冠心病和脑卒中,3 个月死亡率约 15%。急性肺栓塞的临床症状和体征缺乏特异性,因此仅依赖临床表现难以对其进行准确诊断。影像学检查尤其是 CT 肺动脉成像因其高特异度及高敏感度,成为诊断急性肺栓塞的首选影像检查方法。本文从急性肺栓塞的临床诊断算法、CT 在急性肺栓塞检出和危险分级中的价值及 CT 肺动脉成像技术的新进展等方面进行综述。

肺栓塞临床诊断算法

急性肺栓塞的临床表现无特异性,约 65% 的患者会出现胸膜性胸痛,约 20% 的患者有呼吸困难的症状,休克少见,发生率约 10%,还可有深静脉血栓形成引起的下肢肿胀等临床表现。大样本研究结果显示,临床怀疑肺栓塞患者的实际发生率为 10%~30%^[1]。为了避免不必要的 CT 肺动脉成像检查,可首先根据临床诊断算法预测肺栓塞发生的可能性,以排除那些无需进一步行 CT 肺动脉成像检查的患者。临床诊断算法包括临床决策规则和 D-二聚体血浆水平测定。

目前有多种决策规则已被证实可应用于临床工作中,其中最常用的是 Wells 评分(表 1)和修正的 Geneva 评分(表 2)。

表 1 Wells 评分

临床特征	分数	
	原版	简化版
既往有深静脉血栓史或肺栓塞史	1.5	1
心率>100 次/分	1.5	1
近 4 周内手术或制动	1.5	1
咯血	1	1
活动性恶性肿瘤	1	1
深静脉血栓的临床症状或体征	3	1
肺栓塞的可能性大于其他疾病	3	1
临床可能性		
不大可能为 PE	≤4	≤1
很可能为 PE	>4	>1

这两种评分可将疑似肺栓塞患者分为“不大可能组”和“很有可能组”,前瞻性研究结果表明这两类评分标准的诊断准确

度类似^[1]。Wells 评分操作简单,但部分项目主观性较强;修正的 Geneva 评分更加客观,临床上可结合两种方法对肺栓塞的可能性进行判断。

表 2 修正的 Geneva 评分

临床特征	分数	
	原版	简化版
既往有深静脉血栓史或肺栓塞史	3	1
心率		
75~94 次/分	3	1
>95 次/分	5	2
近 1 月内手术或骨折	2	1
咯血	2	1
活动性恶性肿瘤	2	1
单侧下肢疼痛	3	1
单侧下肢深静脉触痛伴下肢水肿	4	1
年龄>65 岁	1	1
临床可能性		
不大可能为 PE	≤5	≤2
很可能为 PE	>5	>2

D-二聚体是交联纤维蛋白的降解产物,常用于急性肺栓塞的诊断。急性血栓形成会伴有血浆 D-二聚体水平的升高;D-二聚体试验阴性预测值较高,能够排除肺栓塞。过去所用 D-二聚体的临界值是 500 μg/L,敏感度可达 95%。但仅凭 D-二聚体水平测定容易出现假阳性结果,特异度较低。年龄是影响 D-二聚体假阳性率的重要因素之一,随着患者年龄增长,D-二聚体水平随之升高,对于年龄>50 岁的患者,当 D-二聚体水平>年龄×10,则可被视为阳性结果。回顾性研究证明根据年龄制定相应的临界值是可行的^[2],可提高 20% 的诊断符合率,而且不会引起假阴性率的升高。

若上述评分结果显示患者不大可能出现肺栓塞,且 D-二聚体处于正常水平,则可排除 25%~46% 的疑似肺栓塞患者,无需进行 CT 肺动脉成像检查;若评分显示可能为肺栓塞或 D-二聚体阳性则需考虑行 CT 肺动脉成像检查。

CT 肺动脉成像的临床应用

MSCT 肺动脉成像诊断急性肺栓塞总的特异度和敏感度分别可达 89%~98% 和 83%~100%;在检测亚段小血栓方面,MSCT 肺动脉成像的显示能力等同于甚至超过核素肺通气/灌注显像及常规的肺动脉造影,因此逐渐代替后两者成为急性肺栓塞的一线检查方法。CT 肺动脉成像结果阴性可排除肺栓塞,并能够避免抗凝治疗带来的副作用。近年来 MSCT 肺动脉

作者单位:210002 南京,南京军区南京总医院/南京大学医学院附属金陵医院医学影像科(林竹潇、张龙江、卢光明);210009 江苏省省直机关医院肾内科(陈燕)

作者简介:林竹潇(1992-),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事心血管影像学研究工作。

通讯作者:卢光明, E-mail: cjr. luguangming@vip.163.com;陈燕, E-mail: chenyanw@163.com

成像在急性肺栓塞中的进展主要体现在以下几个方面:

1. 周围性肺血栓的检出

CT 肺动脉成像诊断中心性肺动脉栓子的阳性预测值可达 98%,但对亚段栓子的阳性预测值仅为 25%。尽管 MSCT 技术已有较大发展,能检测周围性栓子,但仍有部分较小的周围性血栓被漏诊。薄层 CT 虽能够解决这一问题,但会因此增加医生的工作负荷,也存在因为伪影增加使栓子检出的假阳性率增高的问题,反而降低了诊断准确度。计算机辅助诊断(computer aided diagnosis,CAD)系统的应用有助于诊断医师更快、更精确地发现小栓子的存在。有文献认为 CAD 检测周围性肺动脉栓子的敏感度可达 82%,高于医生的诊断敏感度(70%),且不受扫描条件和图像质量影响,但 CAD 存在的假阳性需要医生进行进一步评估^[3]。

除了 CAD 系统外,双能量分析软件“Lung PBV”及“Lung vessels”也可以提高周围性肺血栓的检出率^[4]。首过碘对比剂强化程度代表了肺灌注情况,通过双能量 CT 肺灌注软件“Lung PBV”可获得肺内碘的分布图像,反映静息状态下肺组织灌注情况。若发生肺内血管栓塞,相应的肺实质内会出现楔状或三角形灌注缺损,据此可考虑肺栓塞。但应注意其他疾病也会出现类似肺栓塞的灌注缺损区,与双能量 CT 肺通气成像联合应用可提高肺栓塞的诊断特异度。

肺血管增强软件“Lung vessels”用于显示肺血管内的碘含量,并用不同颜色区分,红色代表碘含量低,蓝色代表碘含量高。Lee 等^[4]的研究显示,“Lung vessels”软件可提高亚段甚至亚段以下小血栓检出的敏感度;Tang 等^[5]以犬模型为研究对象,发现“Lung vessels”软件能够提高亚段周围性血栓检测的敏感度,但会降低特异度,并且因为伪影的存在会出现假阳性结果,因此在应用时需特别注意。

2. CT 在急性肺栓塞危险分级中的价值

右心负荷的评估:血流动力学不稳定的患者(出现休克或低血压)死亡风险较高,需要尽快进行溶栓或栓子切除术;而对血流动力学稳定的患者来讲,病死率为 1%~10%,处于低风险状态,可能无需入院治疗。因此对急性肺栓塞进行危险分级对临床上处理措施的选择十分重要。临床危险因素、实验室参数及影像学结果都可作为分级指标。最新研究认为性别也会引起栓子位置和右心功能障碍发生率的差异^[6],因此肺栓塞右心负荷的评估也应考虑这些因素。所有参数中,CT 肺动脉成像所显示的右心室形态学改变是最常用于急性肺栓塞危险分级的客观影像学指标。

通常,右心室/左心室直径比值能够衡量右心室扩张程度。在 CT 轴面图像上测量室间隔到心室游离壁内侧最大距离即心室最大短轴直径,或者在四腔心位上测量室间隔与心内膜间的最大距离获得左右心室的直径,以此计算右心室/左心室直径比。最近的荟萃分析结果表明,右心室扩张与肺栓塞患者在 30 日内的病死率显著相关,轴位右心室/左心室直径比可作为评估肺栓塞患者病死率的指标^[7]。In 等^[8]认为,轴面右心室/左心室直径比和主肺动脉直径预测右心功能衰竭的敏感度和特异度都很高。Kumamaru 等^[9]则证实,排除患者有充血性心力衰竭、右心室直径>45 mm、年龄>60 岁等情况,四腔心位右心室/左心室直径比正常(<0.9)可以排除因肺栓塞右心超负荷所致的短期死亡。尽管有文献认为,与轴面计算的右心室/

左心室直径比相比,根据四腔心位获得的右心室/左心室直径比提高了预测负性事件的敏感度和特异度^[10];但 Henzler 等^[11]证实,两者在右心功能衰竭的评估方面没有显著差异。右心室/左心室直径比也可利用自动计算软件进行计算,既节省人力,又提高了客观性和精确度,还能达到与人工计算心室直径比相同的准确度^[12],并经证实能够应用于临床^[13]。

除此之外,右心室/左心室体积比(>1.2)也可作为评估右心功能衰竭的指标。首先在轴面图像上人工画出心室轮廓,然后利用容积分析工作站获取左、右心室的体积。相关文献报道,右心室/左心室体积比与病死率和临床负性事件显著相关^[11],并且右心室/左心室体积比较上述测量右心室/左心室直径比的方法,能够更好地预测肺栓塞患者 30 天内的病死率及筛选高风险患者,且具有最高的观察者间的一致性^[14],但心室体积计算相对耗时,而且需要专门的计算软件,因此并不适用于突发事件^[11]。

血栓负荷的评估:肺栓塞负荷可以通过多种评分方法进行评估,根据 CT 肺动脉成像测定的 Qanadli 肺动脉栓塞指数^[15]和 Mastora 肺动脉栓塞指数^[16],是评价肺血栓负荷及其对血流动力学影响的常用参数。Qanadli 评分的计算公式为 $[\Sigma(n \times d)/40] \times 100\%$ ^[15],其中,n 代表栓塞的肺段支气管动脉数量(左、右肺共 20 个肺段,其中两肺上叶分别有 3 段,两肺下叶分别为 5 段,右肺中叶、左肺舌叶各 2 段),d 代表栓塞程度(无栓塞为 0 分,部分栓塞为 1 分,完全栓塞为 2 分),最高阻塞评分为 40 分。肺段以上动脉栓塞视为段动脉完全堵塞,评分为 2 分;亚段级肺动脉发生栓塞,被评价为其所属段级肺动脉的部分栓塞,评分为 1 分,肺段动脉总分不超过 2 分。该评分方法综合肺动脉阻塞位置和阻塞程度进行计算,并且能够评估亚段血管的栓塞情况,具有准确度高及可重复性强的优点。Mastora 等^[16]提出的血管阻塞指数根据阻塞程度进行判断,首先按照动脉位置将肺动脉分为 5 支纵隔肺动脉(主肺动脉干、左右肺动脉、左右叶间动脉)、6 支叶级肺动脉及 20 支段级肺动脉(每肺上叶 3 支,舌叶或中叶 2 支,下叶 5 支),将其阻塞程度分为 5 级(<25%为 1 级,25%~49%为 2 级,50%~74%为 3 级,75%~99%为 4 级,100%为 5 级,分别记为 1~5 分),计算公式是 $[\Sigma(n \times d)/155] \times 100\%$,其中 n 代表肺动脉内栓子的数量(最小值为 1,最大值为 31),d 代表肺动脉栓塞程度(最小值为 1,最大值为 5),155 分为最高阻塞评分。

然而,目前只有少数研究发现血栓负荷与短期内病死率相关,大多数研究无法证实血栓负荷评分与急性肺栓塞短期病死率有显著相关关系^[17]。最近的荟萃分析显示,肺栓塞的位置有助于急性肺栓塞患者的危险分级,中心性肺栓塞比外周性肺栓塞 30 天内病死率高 2 倍,但肺动脉阻塞指数与急性肺栓塞患者 1 个月内及 3 个月内的病死率无关^[18]。不一致的研究结果、复杂耗时的评分系统,使得这种危险分级的方法作为临床预后评估的指标尚有争议,临床应用受到限制^[19]。

3. 双能量 CT 灌注缺损评估

肺灌注缺损范围的大小与肺栓塞患者的预后有关。双能量 CT 灌注损伤算法可对肺灌注缺损程度进行量化评分,包括肺叶灌注缺损积分法、肺灌注缺损容积评估法等,可用于肺栓塞严重程度评估。肺灌注缺损积分法由 Chae 等^[20]提出,其算法类似 Qanadli 评分,将两肺分为各 10 段,每一段的灌注缺损

程度分为 3 级,即正常灌注、灌注轻度减少、灌注明显减少或灌注缺损,分别记为 0~2 分,最高评分为 40 分。灌注缺损积分即灌注缺损评分除以 40。Thieme 等^[21]则在 Chae 的基础上将灌注缺损分为 6 级(0 级:无;1 级:1%~25%;2 级:26%~50%;3 级:51%~75%;4 级:76%~99%;5 级:100%),分别记为 0~5 分,最大值为 100。相关文献证实,肺灌注缺损积分与右心室/左心室直径比尤其是射血分数显著相关,可用于右心室功能障碍的评估及急性肺栓塞患者预后的预测^[17]。而肺灌注容积评估法则是通过计算肺灌注缺损容积与全肺容积的比值,精确判断肺栓塞患者的预后,筛选出不需严密监测的低风险患者^[22]。肺灌注血容量的定量计算也可对肺野灌注缺损进行评估,利用双能量 CT 获得患者的肺灌注血容量分布图,计算出每一像素代表的肺实质的最大强化 CT 值与主肺动脉干最大 CT 值的比值,进而得到标准肺灌注血容量分布图,从中取 1 个或 6 个兴趣区计算平均值作为该患者的灌注血容量值。相关文献证实,定量的肺野灌注情况可在评估疾病严重程度的同时,区分急性肺栓塞患者有无反右心功能衰竭^[23]。以上评分方法均需通过大样本研究进一步验证。

CT 肺动脉成像技术研究进展

1. 低辐射剂量 CT 肺动脉成像

近年来,CT 肺动脉成像检测肺栓塞的价值在临床获得广泛认可,然而,CT 肺动脉成像的大量应用增加了人群的辐射暴露,其潜在致癌风险引起人们对辐射剂量的广泛关注。降低 CT 肺动脉成像辐射剂量已成为共识,可以通过以下两方面实现:一是减少不必要的检查,二是对 CT 肺动脉成像方案进行改进和优化;前者主要是临床医师综合患者病史、症状、体征、实验室检查及利用临床决策支持系统判断进行 CT 肺动脉成像检查的必要性^[24];作为影像医师主要关注的是后者,对每一个个体进行检查时尽可能降低辐射剂量。

影响 CT 辐射剂量的因素包括管电流、管电压、曝光时间、螺距、自动曝光控制及扫描范围等^[25],其中辐射剂量与管电压的平方成正比,因此降低管电压是降低辐射剂量最有效的方法^[26]。有研究证实,将管电压由 120 kV 降至 100 kV,辐射剂量降低了约 53%,且未影响肺栓塞的诊断符合率^[27]。最近的研究甚至将管电压降低至 70 kV,显著降低了 CT 肺动脉检查的辐射剂量,且同时维持了图像的信噪比和对比噪声比^[28],但在体质量指数较大的患者中会存在图像噪声增大、图像质量降低的问题。自动管电压选择软件可在满足诊断要求的前提下,选择使容积 CT 剂量指数最小的管电压。对于体质量指数在正常范围的患者,利用这一技术降低辐射剂量是可行的^[27]。

大螺距采集技术是通过提高扫描速度达到有效降低 CT 肺动脉成像辐射剂量的方法,相关研究表明,大螺距采集技术使 CT 肺动脉成像的辐射剂量降低 47%,并且提高了时间分辨率,降低了图像伪影^[29],在心血管疾病中有较好的应用前景;但该技术可导致图像噪声提高,尤其是对体质量指数较大的患者。

降低管电压、管电流或增大螺距将不可避免导致图像噪声的增加,采用迭代重建算法则能减少图像噪声,使得应用低管电流和/或管电压时,图像质量得以改善,使栓子的检出不受影响^[30],从而达到间接降低辐射剂量的目的。有研究表明,迭代重建算法使大螺距、低管电压 CT 肺动脉成像的图像信噪比提

高了 22%,对比噪声比提高了 31%^[31]。

2. 低对比剂 CT 肺动脉成像

CT 肺动脉成像中碘对比剂的使用存在发生对比剂相关急性肾损伤的风险,因此,降低对比剂负荷也是近些年来该领域研究的热点之一。增加 CT 扫描速度和降低管电压不仅能够降低 CT 肺动脉成像的辐射剂量,还能减少碘对比剂的用量。CT 相关技术如大螺距 CT 的发展使得数据采集速度增加,缩短了最佳的肺动脉显示时间,从而减少了对比剂用量^[32];另外低电压(如 70 kV)穿透能力的降低和光电效应的增强,更接近碘对比剂的 K 边缘,使碘对比剂的固有衰减增大。降低管电压能提高对比强度^[33],补偿对比剂减少的影响。除此之外,有研究通过提高对比剂浓度,在 CT 肺动脉成像过程中进行缓慢团注^[30],这种方式减少了对比剂用量,但并未影响主要血管的显示。在进行低辐射剂量、低对比剂用量 CT 肺动脉成像时,建议联合应用迭代重建技术。Li 等^[34]认为,迭代重建算法联合大螺距、70kV 管电压的应用可实现 CT 肺动脉成像的对比剂剂量降至 40 mL,并且未降低诊断符合率。

CT 肺动脉成像是目前诊断急性肺栓塞较为敏感、快速的检查方法,在外周性肺栓塞的检测、急性肺栓塞的危险分级及预后方面也有重要价值。近年来,CT 肺动脉成像实现了辐射剂量和对比剂用量的双低,且保证了诊断符合率不降低,值得进一步推广应用。

参考文献:

- [1] Douma RA, Mos IC, Erkens PM, et al. Performance of 4 clinical decision rules in the diagnostic management of acute pulmonary embolism: a prospective cohort study[J]. *Ann Intern Med*, 2011, 154(11): 709-718.
- [2] Douma RA, Le GG, Söhne M, et al. Potential of an age adjusted D-dimer cut-off value to improve the exclusion of pulmonary embolism in older patients: a retrospective analysis of three large cohorts [J]. *BMJ*, 2010, 340(4): 375-382.
- [3] Dewailly M, Rémy-Jardin M, Duhamel A, et al. Computer-aided detection of acute pulmonary embolism with 64-slice multi-detector row computed tomography: impact of the scanning conditions and overall image quality in the detection of peripheral clots [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2010, 34(1): 23-30.
- [4] Lee CW, Seo JB, Song JW, et al. Evaluation of computer-aided detection and dual energy software in detection of peripheral pulmonary embolism on dual-energy pulmonary CT angiography [J]. *Eur Radiol*, 2011, 21(1): 54-62.
- [5] Tang CX, Zhang LJ, Han ZH, et al. Dual-energy CT based vascular iodine analysis improves sensitivity for peripheral pulmonary artery thrombus detection: an experimental study in canines [J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(12): 2270-2278.
- [6] Panigada G, Masotti L, Rosi C, et al. Thromboembolic burden, prognostic assessment and outcomes of females compared to males in acute pulmonary embolism [J]. *Acta Clin Belg*, 2016, 71(3): 142-148.
- [7] Becattini C, Agnelli G, Germini F, et al. Computed tomography to assess risk of death in acute pulmonary embolism: a meta-analysis [J]. *Eur Respir J*, 2014, 43(6): 1678-1690.
- [8] In E, Aydin AM, Özdemir C, et al. The efficacy of CT for detection

- of right ventricular dysfunction in acute pulmonary embolism, and comparison with cardiac biomarkers[J]. *Jpn J Radiol*, 2015, 33(8): 471-478.
- [9] Kumamaru KK, George E, Ghosh N, et al. Normal ventricular diameter ratio on CT provides adequate assessment for critical right ventricular strain among patients with acute pulmonary embolism[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(7): 1153-1161.
- [10] Quiroz R, Kucher N, Schoepf UJ, et al. Right ventricular enlargement on chest computed tomography: prognostic role in acute pulmonary embolism[J]. *Circulation*, 2004, 109(20): 2401-2404.
- [11] Henzler T, Krissak R, Reichert M, et al. Volumetric analysis of pulmonary CTA for the assessment of right ventricular dysfunction in patients with acute pulmonary embolism[J]. *Acad Radiol*, 2010, 17(3): 309-315.
- [12] González G, Jiménez-Carretero D, Rodríguez-López S, et al. Automated axial right ventricle to left ventricle diameter ratio computation in computed tomography pulmonary angiography[J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0127797.
- [13] Kumamaru KK, George E, Aghayev A, et al. Implementation and performance of automated software for computing right-to-left ventricular diameter ratio from computed tomography pulmonary angiography Images[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2016, 40(3): 387-392.
- [14] Kang DK, Thilo C, Schoepf UJ, et al. CT signs of right ventricular dysfunction: prognostic role in acute pulmonary embolism[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2011, 4(8): 841-849.
- [15] Qanadli SD, El Hajjam M, Vieillard-Baron A, et al. New CT index to quantify arterial obstruction in pulmonary embolism: a comparison with angiographic index and echocardiography[J]. *AJR*, 2001, 176(6): 1415-1420.
- [16] Mastora I, Remy-Jardin M, Masson P, et al. Severity of acute pulmonary embolism: evaluation of a new spiral CT angiographic score in correlation with echocardiographic data[J]. *Eur Radiol*, 2003, 13(1): 29-35.
- [17] Furlan A, Aghayev A, Chang CC, et al. Short-term mortality in acute pulmonary embolism: clot burden and signs of right heart dysfunction at CT pulmonary angiography[J]. *Radiology*, 2012, 265(1): 283-293.
- [18] Vedovati MC, Germini F, Agnelli G, et al. Prognostic role of embolic burden assessed at computed tomography angiography in patients with acute pulmonary embolism: systematic review and meta-analysis[J]. *J Thromb Haemost*, 2013, 11(12): 2092-2102.
- [19] Meinel FG, Graef A, Bamberg F, et al. Effectiveness of automated quantification of pulmonary perfused blood volume using dual-energy CTPA for the severity assessment of acute pulmonary embolism[J]. *Invest Radiol*, 2013, 48(8): 563-569.
- [20] Chae EJ, Seo JB, Jang YM, et al. Dual-energy CT for assessment of the severity of acute pulmonary embolism: pulmonary perfusion defect score compared with CT angiographic obstruction score and right ventricular/left ventricular diameter ratio[J]. *AJR*, 2010, 194(3): 604-610.
- [21] Thieme SF, Ashoori N, Bamberg F, et al. Severity assessment of pulmonary embolism using dual energy CT-correlation of a pulmonary perfusion defect score with clinical and morphological parameters of blood oxygenation and right ventricular failure[J]. *Eur Radiol*, 2012, 22(2): 269-278.
- [22] Bauer RW, Frellesen C, Renker M, et al. Dual energy CT pulmonary blood volume assessment in acute pulmonary embolism-correlation with D-dimer level, right heart strain and clinical outcome[J]. *Eur Radiol*, 2011, 21(9): 1914-1921.
- [23] Miura S, Ohno Y, Kimura H, et al. Quantitative lung perfused blood volume imaging on dual-energy CT: capability for quantitative assessment of disease severity in patients with acute pulmonary thromboembolism[J]. *Acta Radiol*, 2015, 56(3): 284-293.
- [24] Dunne RM, Ip IK, Abbett S, et al. Effect of evidence-based clinical decision support on the use and yield of CT pulmonary angiographic imaging in hospitalized patients[J]. *Radiology*, 2015, 276(1): 167-174.
- [25] Shahir K, Mccrea JM, Lozano LA, et al. Reduced z-axis technique for CT Pulmonary angiography in pregnancy-validation for practical use and dose reduction[J]. *Emerg Radiol*, 2015, 22(6): 651-656.
- [26] Christner JA, Zavaletta VA, Eusemann CD, et al. Dose reduction in helical CT: dynamically adjustable z-axis X-ray beam collimation[J]. *AJR*, 2010, 194(1): 49-55.
- [27] Wortman JR, Adduci AJ, Sodickson AD. Synergistic radiation dose reduction by combining automatic tube voltage selection and iterative reconstruction[J]. *J Thorac Imaging*, 2016, 31(2): 111-118.
- [28] Wichmann JL, Hu X, Kerl JM, et al. 70kVp computed tomography pulmonary angiography: potential for reduction of iodine load and radiation dose[J]. *J Thorac Imaging*, 2014, 30(1): 69-76.
- [29] Hou DJ, Tso DK, Davison C, et al. Clinical utility of ultra high pitch dual source thoracic CT imaging of acute pulmonary embolism in the emergency department: are we one step closer towards a non-gated triple rule out? [J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(10): 1793-1798.
- [30] Pontana F, Henry S, Duhamel A, et al. Impact of iterative reconstruction on the diagnosis of acute pulmonary embolism (PE) on reduced-dose chest CT angiograms[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(4): 1182-1189.
- [31] McLaughlin PD, Liang T, Homiedan M, et al. High pitch, low voltage dual source CT pulmonary angiography: assessment of image quality and diagnostic acceptability with hybrid iterative reconstruction[J]. *Emerg Radiol*, 2015, 22(2): 117-123.
- [32] Chen GZ, Zhang LJ, Schoepf UJ, et al. Radiation dose and image quality of 70kVp cerebral CT angiography with optimized sinogram-affirmed iterative reconstruction: comparison with 120kVp cerebral CT angiography[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(5): 1453-1463.
- [33] Zhang LJ, Qi L, Wang J, et al. Feasibility of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography with 30mL iodinated contrast agent at 70kVp: initial experience[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(7): 1537-1546.
- [34] Li X, Ni QQ, Schoepf UJ, et al. 70kVp High-pitch computed tomography pulmonary angiography with 40mL contrast agent: initial experience[J]. *Acad Radiol*, 2015, 22(12): 1562-1570.