·临床研究·

三低方案在左心房 CT 血管成像中应用的可行性分析

杨雯　胡永志　王彬彬　曹达*

（南京医科大学第一附属医院放射科，南京 210019）

【摘要】 目的 探讨“三低”（低管电压、低对比剂剂量、低对比剂注射速率）方案在左心房CT血管成像（computed tomography angiography, CTA）中的应用效果，评估“三低”方案在保证影像质量的同时降低辐射剂量和对比剂用量的可行性及价值。**方法** 前瞻性纳入2024年6月—12月在南京医科大学第一附属医院行左心房CTA检查的60例患者，随机分为常规方案组（30例）和“三低”方案组（30例）。常规组采用管电压120 kV、对比剂用量0.9 mL/kg、注射流速5.0 mL/s及滤波反投影（filtered back projection, FBP）算法；“三低”组采用管电压100 kV、对比剂用量0.7 mL/kg、注射流速4.0 mL/s及混合迭代重建（hybrid iterative reconstruction, HIR）算法。对比两组图像质量主观评分、信号噪声比（signal-to-noise ratio, SNR）、对比噪声比（contrast-to-noise ratio, CNR）、有效剂量（effective dose, ED）及碘摄入量。**结果** 两组图像质量主观评分均符合诊断标准，组间比较差异无统计学意义（$P>0.05$）。“三低”组左心房平均CT值显著高于常规组（$P<0.01$），但两组的SNR与CNR比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。“三低”组碘摄入量及有效辐射剂量均显著低于常规组（$P<0.01$）。**结论** “三低”方案在左心房CTA中可显著降低辐射剂量和对比剂用量，同时保证影像质量，为患者提供更优的影像学检查方案，具有一定的临床应用价值。

【关键词】 “三低”方案；左心房CT血管成像；辐射剂量；对比剂用量；图像质量；迭代重建算法

【中图分类号】 R445.3　　**【文献标识码】** A　**【DOI】** 10.11876/mimt202503010

Application value of the triple-low protocol in left atrial CT angiography

Yang Wen, *Hu Yongzhi*, *Wang Binbin*, *Cao Da**

(*Department of Radiology*, *the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University*, *Nanjing 210019*, *China*)

【Abstract】 Objective To investigate the application effect of the “triple-low” protocol (low tube voltage, low contrast agent dose, and low injection rate) in left atrial computed tomography angiography (CTA) and evaluate its feasibility and value in reducing radiation dose and contrast agent usage while ensuring image quality. **Methods** Sixty patients who underwent left atrial CTA examinations at the Radiology Department of the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University from June 2024 to December 2024 were prospectively enrolled and randomly divided into a conventional protocol group ($n=30$) and a “triple-low” protocol group ($n=30$). The conventional group used 120 kV tube voltage, 0.9 mL/kg contrast agent dose, 5.0 mL/s injection rate, and filtered back projection (FBP) algorithm. The “triple-low” group used 100 kV tube voltage, 0.7 mL/kg contrast agent dose, 4.0 mL/s injection rate, and hybrid iterative reconstruction (HIR) algorithm. Subjective image scores, signal-to-noise ratio (SNR), contrast-to-noise ratio (CNR), effective radiation dose (ED), and iodine intake were compared between the two groups. **Results** Both groups met diagnostic standards for subjective image quality, with no significant intergroup differences ($P>0.05$). The “triple-low” group showed significantly higher mean CT values in the left atrium compared to the conventional group ($P<0.01$), but there were no significant differences in SNR and CNR ($P>0.05$). The “triple-low” group exhibited significantly

基金项目：南京医科大学常州医学中心重点项目（CMCM202305）

第一作者：杨雯，女，本科，技师，研究方向：医学图像处理

通信作者：曹达，男，硕士研究生，主管技师，研究方向：医学图像处理与医学图像合成

lower iodine intake and effective radiation dose than the conventional group (P<0.01). **Conclusion** The "triple-low" protocol significantly reduces radiation dose and contrast agent usage in left atrial CTA while maintaining image quality, offering a superior imaging solution for patients and demonstrating promising clinical value.

【Key words】 Triple-low protocol; Left atrial computed tomography angiography; Radiation dose; Contrast agent usage; Image quality; Iterative reconstruction algorithm

心房颤动是常见的持续性心律失常之一，显著增加卒中和动脉栓塞风险。有研究[1]发现，单纯性房颤患者90%的血栓来源于左心耳。左心耳是从左心房伸出的一个盲端结构，左心房CT血管成像（computed tomography angiography, CTA）能够清晰显示左心房、肺静脉等结构，为射频消融术的术前定位和术后复查提供丰富的解剖学依据[2-3]。同时，左心房CTA延迟扫描可排除左心耳血栓的存在，对左心耳封堵术前、术后的评价也具有重要价值[4]。

然而，传统CTA方案的高辐射剂量及对比剂用量显著增加患者辐射相关癌症风险及对比剂肾病（contrast induced nephronpathy, CIN）发生率[5]，因此亟需优化扫描方案。近年来，"三低"即低管电压（low tube voltage）、低对比剂剂量（low contrast agent dose）及低对比剂注射速率（low contrast injection rate）方案，与先进的混合型迭代重建算法相结合，为优化影像质量、减少辐射剂量和对比剂使用量提供了新的思路[6]。

目前，"三低"方案在其他影像学检查中已逐渐得到应用并显示出优势[7]，但在左心房CTA中的应用仍处于探索阶段，相关研究和临床实践相对较少。本研究旨在探讨"三低"方案在左心房CTA中的应用效果，评估"三低"方案在确保影像质量的同时降低辐射剂量和对比剂用量的可行性和价值，从而为患者提供更优的影像学检查方案。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究前瞻性纳入2024年6月—12月因临床怀疑单纯性心房颤动在南京医科大学第一附属医院行左心房CTA检查的60例患者。患者随机分为常规方案组（30例）和"三低"方案组（30例）。排除标准[3]包括：①严重心、肝、肾功能不全者；②体质量指数（body mass index, BMI）≥25 kg/m²者；③碘对比剂过敏者；④支架植入术后有明显金属伪影者；⑤妊娠期或哺乳期女性。本研究已通过南京医科大学第一附属医院医学伦理审查委员会批准（审批号：2024-YKL02-002）。

1.2 检查方法

扫描前，患者接受标准化呼吸训练及心电导联连接，并签署知情同意书。扫描使用联影uCT 960+（640层）CT设备，扫描范围从支气管分叉处至心脏膈面下约1 cm。两组均采用双筒高压注射器，经右肘正中静脉注射非离子型对比剂碘普罗胺（由Bayer AG生产，国药准字HJ20171340，规格为100 mL∶76.89 g，浓度：370 mg I/mL）。两组均采用对比剂跟踪法（bolus-tracking），设置主动脉根部层面为连续曝光层面，升主动脉作为感兴趣区域（region of interest, ROI）进行观察。注射对比剂12 s后开始连续曝光，监测ROI CT值的变化，并将触发阈值设置为120 HU。达到阈值后，延时4.8 s后自动开始扫描。对比剂注射结束后，立即以相同流速注入30 mL生理盐水。

具体扫描参数如下。①常规方案组：管电压为120 kV，管电流为180 mAs，球管旋转时间为0.25 s，层厚为0.5 mm，重建间隔为0.5 mm，对比剂用量为0.9 mL/kg，注射流速为5.0 mL/s，采用滤波反投影（filtered back-projection, FBP）算法重建图像，使用回顾性心电门控技术，采集范围为10% ~ 80%[8]。②"三低"方案组：管电压为100 kV，管电流为180 mAs，球管旋转时间为0.25 s，层厚为0.5 mm，重建间隔为0.5 mm，对比剂用量为0.7 mL/kg，注射流速为4.0 mL/s，采用混合型迭代重建算法（hybrid iterative reconstruction, HIR）——KARL 3D重建图像，重建强度等级为7[9]，使用回顾性心电门控技术，采集范围为10% ~ 80%。

1.3 图像后处理

原始图像各期相经重建后传至联影工作站进行后处理重建，包括容积重建（volume rendering，VR）、多平面重建（multiple planar reformation, MPR）。具体后

处理包括：通过MPR获取心脏长轴位、短轴位及四腔心切面图像，结合VR构建左心房立体模型。

1.4 图像分析

1.4.1 定性分析

图像分析采用双盲法，由2位具有5年以上工作经验的诊断医师独立评估，分别对影像质量进行评分。针对评分差异 >2分的病例，引入第3位具有10年以上工作经验的心血管影像学方向的诊断医师进行仲裁分析，以达成统一评分，最终得出图像质量的综合评分。重点观察层面选取前斜位及横轴位，并系统评估左心房及其左心耳、肺静脉及其分支的解剖结构特征。图像质量的主观评价采用5分法[10]，具体评分标准如下。

5分：整体图像质量优秀，无伪影，解剖细节显示清晰；4分：整体图像质量较好，解剖结构显示较清楚，有少许伪影；3分：整体图像质量尚可，有较多伪影，但大部分解剖结构显示好，可以满足诊断；2分：整体图像质量不佳，解剖结构显示不清，有中度伪影；1分：整体图像质量差，解剖结构显示不清，有严重伪影，无法诊断。最终评分若≥3分，则认为图像符合影像诊断要求。

1.4.2 定量分析

对比两组图像的信号噪声比（signal-to-noise ratio, SNR）和对比噪声比（contrast-to-noise ratio, CNR）[7]，相关计算公式如下。

$$SNR = CT_{左心房} / SD \quad (1)$$

$$CNR = (CT_{左心房} - CT_{竖脊肌}) / SD \quad (2)$$

其中，$CT_{左心房}$测量的是左心房CT值，在左心房中央区域选取ROI面积约为(10 ± 1) mm²，测量CT值。背景噪声SD定义为测量左心房CT值区域的标准差（standard deviation, SD）。$CT_{竖脊肌}$则是在同一层面脊柱两侧竖脊肌的CT值，ROI面积约为（10 ± 1）mm²，取其平均值作为最终结果。

1.5 辐射剂量及对比剂中碘摄入量

记录患者剂量报告中的相关剂量参数，包括容积CT剂量指数（volume CT dose index, $CTDI_{vol}$）和剂量长度乘积（dose-length product, DLP），并据此计算有效剂量（effective dose, ED）。ED的计算公式如下。

$$ED = DLP \times k \quad (3)$$

其中，k值依据欧盟委员会CT质量标准规定，取值为0.014[11]。

同时，计算碘摄入量（I，单位：g），其计算公式为：I（g）= 对比剂浓度（370 mg/mL）× 对比剂用量（mL）/ 1000[12]。

1.6 统计学方法

使用SPSS 20.0软件对所得数据进行统计分析，计量资料以均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示；两组受检患者的性别采用卡方检验分析；年龄、体重、BMI、心率均符合正态性分布，比较采用t检验；采用Mann-Whitney U法检验图像主观评分；两组图像左心房CT值、背景噪声SD、SNR、CNR、DLP、ED等均符合正态性分布，比较采用t检验。以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组常规资料比较

常规方案组（对照组）与“三低”方案组（实验组）各纳入30例患者，两组性别分布、年龄、体重、BMI及心率等资料比较差异均无统计学意义（P>0.05），表明两组具有可比性。见表1。

表1 两组常规资料比较（$\bar{x} \pm s$）

组别	例数	性别（例）		年龄（岁）	体重（kg）	BMI（kg/m²）	心率（次/min）
		男	女				
常规方案组	30	17	13	64.07 9.35	64.60 6.28	23.02 3.21	67.97 8.26
“三低”方案组	30	18	12	65.87 8.07	64.67 6.71	22.66 2.81	68.57 6.18
χ^2/t值		0.793[a]		0.087[b]	−0.039[b]	0.448[b]	−0.313[b]
P值		0.690		0.931	0.969	0.656	0.755

注：BMI为体质量指数；[a]为χ^2值；[b]为t值。

2.2 图像质量主观评价

图像质量主观评价结果如表2所示，两组图像质量主观评分均符合临床诊断标准（≥3分），组间差异无统计学意义（P>0.05）。常规方案组与“三低”方案组分别有83.3%（25/30）和76.7%（23/30）的病例评分≥4分。

表 2 两组图像质量主观评价结果比较（例）

组别	例数	评分				
		5	4	3	2	1
常规方案组	30	10	15	5	0	0
“三低”方案组	30	9	14	7	0	0
Z 值		−0.522				
P 值		0.602				

2.3 图像质量客观评价

图像质量客观评价结果如表 3 所示，“三低”方案组的左心房平均 CT 值显著高于常规方案组（$P<0.01$）；“三低”组的 SNR 与 CNR 均高于常规组，但差异无统计学意义（$P>0.05$）。

表 3 两组图像质量客观评价结果比较（HU，$\bar{x} \pm s$）

组别	例数	左心房平均 CT 值	脊柱两侧软组织平均 CT 值	背景噪声 SD	SNR	CNR
常规方案组	30	378.72 33.67	48.02 4.76	9.44 1.85	41.81 9.50	36.55 8.78
“三低”方案组	30	481.92 36.26	56.13 5.87	10.76 1.85	46.49 10.55	41.11 9.60
t 值		−11.230	−5.781	−2.718	−1.776	−1.889
P 值		<0.01	<0.01	0.009	0.081	0.064

注：背景噪声 SD 为测量左心房 CT 值区域的标准差；SNR 为信号噪声比；CNR 为对比噪声比。

2.4 对比剂用量及辐射剂量分析

对比剂用量及辐射剂量分析如表 4 所示，“三低”方案组的碘摄入量及有效辐射剂量均显著低于常规方案组（$P<0.01$）。

表 4 两组对比剂用量及辐射剂量比较（$\bar{x} \pm s$）

组别	例数	碘摄入量（g）	$CTDI_{vol}$（mGy）	DLP（mGy cm）	ED（mSv）
常规方案组	30	21.51 2.09	31.36 4.80	453.23 72.34	6.35 1.01
“三低”方案组	30	16.75 1.74	16.90 3.27	237.69 45.86	3.33 0.64
t 值		9.430	13.415	13.551	13.541
P 值		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注：$CTDI_{vol}$ 为容积 CT 剂量指数；DLP 为剂量长度乘积；ED 为有效剂量。

3 讨论

随着影像学技术的不断革新，如何在保证诊断效能的前提下降低 CT 检查的辐射风险及对比剂相关不良反应，已成为心血管影像领域的重要研究方向[13]。本研究聚焦“三低”（低管电压、低对比剂剂量、低对比剂注射速率）方案在左心房 CTA 中的应用效果，通过与常规方案的对比，探讨“三低”方案在保证影像质量的同时降低辐射剂量和对比剂用量的可行性和价值。

本研究发现“三低”方案在左心房 CTA 中能够显著降低辐射剂量和对比剂用量，同时保持图像质量符合诊断标准，这与在其他部位应用“三低”方案的研究结果基本一致。例如，张芳等[14]在头颈 CTA 中采用类似的“三低”技术，也观察到了辐射剂量和对比剂用量的显著降低，且图像质量未受到明显影响，说明“三低”方案在不同的心血管影像学检查中具有一定的普适性，能够有效优化检查参数，减少对患者的不良影响。然而，与部分既往研究[15]相比，本研究中“三低”方案组的图像背景噪声略高于常规方案组，这可能是由不同的图像重建算法的差异导致的。

本研究中，“三低”方案能够显著降低辐射剂量和对比剂用量，其机制主要在于降低管电压、对比剂剂量和注射速率。辐射剂量与管电压的平方近似成正比，因此降低管电压能够显著减少患者接受的辐射暴露[16]。同时，低对比剂剂量和低注射速率减少了对比剂的使用量，也间接降低了因对比剂使用带来的潜在风险。尽管降低了管电压和对比剂用量，但通过采用 HIR，本研究成功地保持了图像质量。HIR 算法通过分层迭代策略实现多维度优化，首先在投影域进行噪声统计建模消除量子噪声，随后在图像域通过卷积神经网络恢复解剖细

节，从而在低剂量条件下仍能获得清晰的图像。此外，低管电压条件下，X线光子能量降低，使对比剂的碘信号增强，从而提高了图像的对比度，这在一定程度上弥补了因对比剂用量减少可能导致的图像对比度下降[17]。

本研究存在一定的局限性。首先，样本量相对较小，这可能在一定程度上限制了研究结果的普适性。在实验过程中发现，对于肥胖患者，该“三低”方案可能无法保证足够的图像质量用于诊断。尽管研究结果具有一定的统计学意义，但为了更全面地验证“三低”方案在不同患者群体中的应用效果，未来有必要进一步扩大样本量进行深入研究。其次，本研究仅聚焦“三低”方案对左心房CTA图像质量的影响，未能深入探讨“三低”方案对临床诊断的直接作用。后续研究可以考虑结合临床诊断数据，综合评估“三低”方案对诊断准确性和患者预后的影响。此外，本研究中HIR算法的重建强度等级选择是基于已有研究，而非通过自身实验优化得出。在后续研究中，可以进一步分析不同重建强度等级对图像质量的具体影响，以确定更优的参数设置，从而进一步提升“三低”方案在左心房CTA中的应用价值和效果。

综上所述，“三低”方案在左心房CTA中具有良好的应用价值，能够在保证图像质量的前提下，显著降低辐射剂量和对比剂用量。对于需要长期管理和治疗的房颤患者，如消融术后需要多次复查或长期随访的患者，“三低”方案能够显著降低辐射剂量和对比剂用量，从而降低患者因多次CT检查而累积的辐射相关癌症风险和对比剂肾病发生率。同时，低注射速率可减少对比剂短时间内大量进入循环系统引起的心脏负荷增加，对心力衰竭或左心室功能减退的患者具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] Meier B, Palacios I, Windecker S, et al. Transcatheter left atrial appendage occlusion with Amplatzer devices to obviate anticoagulation in patients with atrial fibrillation [J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2003, 60(3): 417–422.

[2] Guglielmo M, Baggiano A, Muscogiuri G, et al. Multimodality imaging of left atrium in patients with atrial fibrillation [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2019, 13(6): 340–346.

[3] 曹建, 陈井亚, 陈凯, 等. 256层iCT双低剂量扫描联合全模型迭代重建在左心房–肺静脉CTA中的应用[J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(5): 48–52.

[4] 黄晓华, 陈玉香, 谢超贤, 等. CTA定量评价广西壮族人群非瓣膜性房颤患者左心耳结构与血栓形成关联性及意义[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(8): 75–78.

[5] 马丽娅, 李震, 沈亚琪, 等. 碘对比剂相关急性肾损伤及相关危险因素的大样本回顾性研究[J]. 放射学实践, 2018, 33(9): 918–922.

[6] 汤振华. 迭代重建算法在双源CT三低方案冠状动脉血管成像中的应用价值[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(3): 231–236.

[7] Wang S, Sun Z, Zeng Y, et al. Feasibility study of 'Triple–Low' technique for coronary artery computed tomography angiography (CCTA) [J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 32110.

[8] 赖迪, 缪俞凤, 王甜, 等. 左心房CTA容积扫描模式在房颤患者射频消融术前的应用[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2024, 30(6): 670–673.

[9] 童小雨, 李贝贝, 王旭, 等. 1024×1024重建矩阵结合迭代重建算法在胃部CT血管成像中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(6): 622–627.

[10] Ippolito D, De Vito A, Franzesi C T, et al. Evaluation of image quality and radiation dose saving comparing knowledge model–based iterative reconstruction on 80–kV CT pulmonary angiography (CTPA) with hybrid iterative reconstruction on 100–kV CT [J]. Emerg Radiol, 2019, 26(2): 145–153.

[11] Crimm H A, Fergestrom N M, Dye C, et al. Focused, low tube potential, coronary calcium assessment prior to coronary CT angiography: a prospective, randomized clinical trial [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2021, 15(3): 240–245.

[12] Pan C, Yu T, Zhao H, et al. Evaluation of pancreatic iodine uptake and related influential factors in multiphase dual–energy CT [J]. Eur Radiol, 2024, 34(12): 7609–7621.

[13] Hagen F, Hofmann J, Wrazidlo R, et al. Image quality and dose exposure of contrast–enhanced abdominal CT on a 1st generation clinical dual–source photon–counting detector CT in obese patients vs. a 2nd generation dual–source dual energy integrating detector CT [J]. Eur J Radiol, 2022, 151: 110325.

[14] 张芳, 张磊, 汝海燕, 等. “三低剂量”扫描在头颈CT血管成像检查中的应用价值[J]. 吉林医学, 2024, 45(7): 1544–1548.

[15] 郝辉, 朱书萌, 赵文哲, 等. 不同重建算法对定量CT椎体骨密度测定准确性的影响[J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31(10): 1090–1095.

[16] 杨尚文, 邵明冉, 杨献峰, 等. “三低”技术联合全模型迭代重建算法在头颈部CT血管成像中的可行性研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(1): 62–67.

[17] Yang L, Liu H, Han J, et al. Ultra–low–dose CT lung screening with artificial intelligence iterative reconstruction: evaluation via automatic nodule–detection software [J]. Clin Radiol, 2023, 78(7): 525–531.