论著



吕	\mathbb{H}^1	陈富	唇1	夏连坤1
张		陈杏质	彭2	辛小燕1,*

 南京大学医学院附属鼓楼医院医学影像 科(江苏南京 210008)

2.飞利浦医疗临床科研部(上海 200070)

【摘要】目的 对比双层探测器CT肺动脉CTA成像 虚拟单能量与混合能量的图像质量。**方法** 回顾性 分析行双层探测器CT肺动脉CTA检查的30例患者资 料。测量动脉期主肺动脉干、左/右肺动脉干、左 /右肺下叶动脉混合能量以及40-90 keV单能量图像 的CT值和标准差(SD)值,计算信噪比(SNR)和对比 噪声比(CNR)。配对样本t检验比较各单能量与混合 能量图像SNR及CNR,Kappa值评估两名影像科医 师主观评分一致性,非参数Wilcoxon秩检验判断各 单能量和混合能量图像评分的差异。结果 感兴趣 区80 keV与混合能量的SNR及CNR没有统计学差异 (P>0.05),除85和90 keV,其他单能量指标均优于 混合能量(P均<0.05)。两名影像科医师评分的一致 性好(Kappa=0.862,P<0.05),50和55 keV图像的平 均得分高于混合能量,其他单能量均低于混合能量 (P均<0.05)。结论 双层探测器CT肺动脉CTA成像的最 佳单能量范围50-55 keV,其中50 keV为最佳单能量。

【关键词】双层探测器CT;最佳虚拟单能量;混合能量;肺动脉
【中图分类号】R445.3
【文献标识码】A
【基金项目】国家自然科学基金项目 (81720108022)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.02.027

Comparing the Quality of Image between Virtual Mono-energy and Conventional Hybrid Energy for Dual-detector CT in Pulmonary Artery CTA*

LV Pin¹,CHEN Lu¹,XIA Lian-kun¹,ZHANG Bing¹,CHEN Xing-biao²,XIN Xiao-Yan^{1,*}.

1.Department of Radiology, The Affiliated Drum Tower Hospital of Nanjing University Medical School, Nanjing 210008, Jiangsu Province, China

2. Clinical & Technical Solutions, Philips, Shanghai 200070, China

ABSTRACT

Objective To investigate the quality of image between virtual mono-energy and hybrid-energy in pulmonary artery for dual-detector CT. **Method** 30 patients are retrospective analysed who take the pulmonary artery CTA examination by dual-detector CT. Measure and compare the CT,signal-noise-ratio,contrast-noise-ratio and standard deviation of background for Pulmonary trunk,left/right pulmonary trunk,left/right lower pulmonary trunk on different mono-Energy (range from 40-90 keV) and hybrid energy. Paired sample t test is used to compare SNR and CNR differences between virtual mono-energy and hybrid-energy. The consistency of image quality scores between two radiologists is assessed by the Kappa coefficient. The differences in scoring between mono-energy and hybrid-energy are evaluated through non-parametric Wilcoxon test. **Result** There is no statistic difference between 80 keV and hybrid-energy (P<0.05) for region of interest. The SNR and CNR of mono-energy are better than hybird-energy (P<0.05). The average scores of mono-energy were lower than hybrid-energy (P<0.05). The average scores of mono-energy were lower than hybrid-energy (P<0.05) except 50 and 55 keV. **Conclusion** The optimal range of virtual mono-energy in pulmonary artery for spectral CT is 50-55 keV, and the optimal energy is 50 keV.

Keywords: Dual-Detector CT,Optimal Virtual Mono-Energy,hybrid-Energy,Pulmonary Artery

肺动脉CT血管(CT angiography,CTA)成像因其操作简单且准确率高,成为筛查肺动脉相关疾病的首选方案^[1-2],获得高质量的肺动脉CTA图像对于提高诊断的准确性具有重要意义。近年来,能谱CT已广泛应用于临床检查和诊断中。与传统CT相比,能谱技术能够进行多参数成像和定量分析,如虚拟单能量图像、能谱曲线、碘密度图和原子序数图等。本研究所使用的双层探测器CT(IQon Spectral CT,PHILIPS)作为新型商业化能谱CT的一种^[3],其特点是具有立体双层探测器结构,可分别同时接收穿过人体的低能和高能X射线,满足能谱CT"同时、同源、同相位"的最佳成像原则。双层探测器CT扫描完成后系统自动生成基于能谱的影像(Spectral Based Image,SBI)序列,利用PHILIPS后处理工作站可以重建出40~200keV的全部虚拟单能量图像。目前临床主要依据传统混合能量图像进行医学诊断,针对肺栓塞等存在信噪比(Signal to Noise Ratio,SNR)低、诊断敏感度下降等缺点。本研究旨在探讨双层探测器CT肺动脉CTA成像的最佳虚拟单能量,并与传统混合能量进行图像质量对比,发掘单能量成像的优势。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析2019年4月至2020年12月南京大学医学院附属鼓楼医院30例 行肺动脉CTA扫描病例,其中男性16名,平均年龄57.68岁±15.62,所有患者均无对比 剂过敏史,无肝肾功能不全等病症。

入组标准:行IQon CT肺动脉CTA检查,有动脉期增强的全能谱图像。排除标准: 伴有栓子、血管狭窄等明显影响勾画感兴趣区(Region of interest,ROI)的病例;图像质 量不佳,如明显断层,呼吸运动伪影等。

1.2 方法 采用IQon CT行肺动脉CTA扫描,扫描内容包括动脉增强期,扫描范围自肺尖 至肺底。参数:管电压120 kVp,管电流智能调节,扫描层厚1 mm。动脉增强扫描触发 采用自动监测技术(Bolus Tracking),监测层放置在气管分叉处向上1~2cm处,上腔静 脉处设置监测点,CT值>150 HU触发扫描。

肺动脉CTA扫描所用非离子型碘造影剂(碘佛醇,碘含量320 mg l/mL),注射剂量45 mL,注射速度4.5mL/s,使用双筒高压注射器经肘部静脉注入。每期图像均生成SBI序列,传输至PHILIPS能谱工作站重建得到虚拟单能量图像。

1.3 客观评价指标 在PHILIPS后处理工作站重建出动脉增强期的虚拟单能量图像,能量范围40-90 keV,间隔5 keV共计11个单能量,>90 keV的虚拟单能量图像明显无法满足诊断,不纳入本研究范围。在主肺动脉干、左/右肺动脉干及左/右肺下叶动脉腔内各勾画一个ROI,面积约20-30 mm2,同级分支取左右ROI的平均值,避开栓子和边界不清晰区域。记录ROI的CT值、SD值以同层面竖脊肌的CT值和SD值作为背景噪声。计算不

同能量下主肺动脉干、左/右肺动脉干、左/右肺下叶动脉的SNR 和对比噪声比(Contrast noise ratio,CNR),计算公式为SNR=CT 值血管/SD值血管; CNR=(CT值血管-CT值竖脊肌)/SD值竖脊肌。 **1.4 主观评价指标** 2名具有3年以上诊断经验的影像科医师独 立对原始图像以及三维重建肺动脉图像进行主观评价,采用5分 制,评价标准为:5分,优秀,无明显伪影,肺动脉分支及组织 细节分辨率良好;4分,较好,伪影不明显,肺动脉分支及组织 细节显示较好;3分,中等,有明显伪影,肺动脉分支及组织细 节有明显不清晰,可基本满足诊断;2分,较差,伪影较严重, 肺动脉分支和组织细节显示效果差,大部分区域无法满足诊断; 1分,图像无法满足诊断。当2名医师的评判结果差异>2分时,由 两位医师协商给出结果。

1.5 统计学方法 采用SPSS 26.0对数据进行统计和分析。 Shapiro-Wilk检验统计数据是否符合正态分布,符合则用均值土 标准差(±SD)表示。以肺动脉的混合能量指标为参考基线,每个 虚拟单能量图的客观评价指标(SNR和CNR)与基线进行配对样本t 检验,P<0.05表示差异有统计学意义,利用Kappa分析评估2名 医师主观评分的一致性,并通过非参数Wilcoxon符号秩检验对不 同能量下的评分结果进行分析。

表1 混合能量和虚拟单能量下CT、SD、SNR、CNR值

能量(keV)	SNR	T值	P值	CNR	T值	P值
Hybrid	18.0±4.8	/	/	14.6±5.2	/	/
	15.2±4.0	/	/	14.1±5.3	/	/
	19.3±6.7	/	/	15.0 ± 5.7	/	/
40	53.8±17.7	-11.905	< 0.001	57.5±22.8	-11.201	<0.001
	44.8±19.0	-12.445	< 0.001	57.6±23.4	-15.726	<0.001
	56.3±21.8	-15.491	< 0.001	55.5±22.9	-15.195	< 0.001
45	46.5±14.8	-12.220	< 0.001	47.7±18.8	-11.167	<0.001
	38.7±15.9	-12.390	< 0.001	47.5±18.8	-16.237	<0.001
	48.5 ± 18.3	-16.041	< 0.001	46.3±18.7	-15.840	<0.001
50	40.0 ± 12.4	-13.311	< 0.001	39.7±15.4	-11.282	<0.001
	33.7±12.9	-12.787	< 0.001	39.4±15.5	-16.171	< 0.001
	41.7 ± 15.4	-16.422	< 0.001	38.5±15.4	-15.865	< 0.001
55	34.3 ± 10.3	-12.266	< 0.001	33.0 ± 12.6	-11.182	<0.001
	29.4 ± 10.6	-12.902	< 0.001	32.7±12.8	-16.058	< 0.001
	35.9±13.0	-16.681	< 0.001	32.0±12.7	-15.910	<0.001
60	29.6±8.7	-11.855	< 0.001	26.6 ± 12.0	-7.316	< 0.001
	26.0±8.8	-12.680	< 0.001	27.1 ± 10.9	-14.746	< 0.001
	31.0 ± 11.1	-16.740	< 0.001	26.5 ± 10.8	-14.322	< 0.001
65	25.7±7.5	-10.706	< 0.001	23.2±8.9	-9.958	< 0.001
	22.5±7.4	-11.828	<0.001	23.0±9.1	-14.401	< 0.001
	26.9±9.4	-16.376	<0.001	22.7±8.9	-14.679	<0.001
70	22.4±6.4	-8.655	< 0.001	19.8±7.5	-8.754	< 0.001
	19.9 ± 6.3	-10.151	< 0.001	19.6 ± 7.7	-12.797	<0.001
	23.6±8.2	-14.168	<0.001	19.3±7.6	-12.899	<0.001
75	19.2±5.9	-1.911	0.069	16.2 ± 6.2	-2.260	0.034
	17.5±5.2	-6.189	< 0.001	16.7 ± 6.6	-7.517	< 0.001
	20.9±7.2	-7.150	< 0.001	16.6 ± 6.5	-7.630	< 0.001
80	17.6±4.8	1.131	0.270	14.6 ± 5.6	-0.215	0.832
	15.8±4.7	-1.669	0.102	14.5 ± 5.7	-1.615	0.113
	18.6 ± 6.3	1.872	0.068	14.4 ± 5.6	1.941	0.059
85	15.8±4.2	6.485	< 0.001	12.7±4.9	7.132	< 0.001
	14.2 ± 4.1	3.733	0.001	12.6 ± 5.0	7.214	<0.001
	16.7±5.5	9.790	< 0.001	12.6±4.9	12.497	< 0.001
90	14.2±3.8	9.913	< 0.001	11.2±4.3	11.291	< 0.001
	12.9±3.6	9.315	< 0.001	11.1±4.4	12.679	< 0.001
	15.2±5.0	12.620	< 0.001	11.8±4.2	15.459	<0.001

注:每个能量段的三行数据分别为主肺动脉干、左/右肺动脉干、左/右下叶肺动脉

2 结 果

2.1 客观评价指标 经过Shapiro-Wilk检验,所有客观评价指标 均符合正态分布。主肺动脉干、左/右肺动脉干、左/右肺下叶 动脉的CT值、SNR和CNR以及同层面竖脊肌的CT值和SD值随 虚拟单能量(40-90 keV)增大逐渐减小,三个位置40-75 keV共9 个虚拟单能量的SNR和CNR均明显优于混合能量(P<0.05,结果 见图1及表1),80 keV的SNR(17.6±4.8/15.8±4.7/18.6±6.3) 和 C N R (14.6±5.6/14.5±5.7/14.4±5.6)与传统混 合能量(SNR: 18.0±4.8/15.2±4.0/19.3±6.7; C N R: 14.6±5.2/14.1±5.3/15.0±5.7)的差异没有统计学意义,85 keV 及90 keV单能量图像的SNR和CNR明显低干混合能量(P<0.05)。

2.2 主观评价指标 两位影像科医师对图像主观评分的一致性 好,Kappa值为0.862,P<0.05,评分结果见表2,肺动脉三维 重建结果见图2。各虚拟单能量与混合能量主观评分比较,P值均 <0.05。50 keV(4.60分±0.24)及55 keV(4.40分±0.19)图像的主 观评分明显优于混合能量(4.20分±0.25),其中50 keV的主观评 分优于55 keV(P<0.001),重建结果显示50 keV能量下肺动脉各级 分支最完整,质量最佳。其他单能量的主观评分结果均低于混合 能量。

表2 两名影像科医师对30例肺动脉不同能量图像主观评分结果

像科医师2(分) 影像科医师1			(分)		
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	80	3	0	0
3	0	6	90	5	0
4	0	0	4	115	12
5	0	0	0	6	39

表3 两名影像科医师对30例肺动脉不同能量图像主观评分

结果比较			
能量(keV)	主观评价(分)	虚拟单能量	vs 混合能量
		Z	Р
混合能量	4.20±0.30	/	/
40	3.20 ± 0.18	-3.638	< 0.001
45	4.10±0.36	-3.690	< 0.001
50	4.60±0.24	-7.363	< 0.001
55	4.40±0.19	-6.398	< 0.001
60	4.10±0.37	-3.317	0.01
65	3.70 ± 0.32	-2.191	0.028
70	3.30 ± 0.25	-7.000	< 0.001
75	2.70±0.22	-6.597	< 0.001
80	2.40±0.24	-7.239	< 0.001
85	2.30±0.36	-7.239	< 0.001
90	2.20±0.13	-7.239	< 0.001

3 讨 论

本研究所使用的IQon CT的成像原理是在不改变射线球管数 量和射线能量的情况下,通过两层探测器结构分别获得穿过人体 的低能和高能射线,并利用两个能量段的信息重建能谱数据。其 中虚拟单能量是指模拟单一固定能量X射线进行扫描,也是目前 临床使用最多的能谱结果^[4-5],Sun^[6]等人利用能谱CT技术讨论下 肢动脉血管成像的最佳单能量,通过CNR和主观评分确定最佳单 能量为51.5 keV±7.3,Wang^[7]等人采用能谱CT对比虚拟单能量 在肺癌不典型成骨性转移病灶的成像优势,通过分析SNR、CNR 和主观评价指标得出结论: 60 keV能量的图像质量优于混合能 量。单能量成像优势与射线能量高低有关,低能射线更接近造影 剂中碘的K-edge能量(33.2 keV),X射线与体内物质发生相互作用 以光电效应为主^[8],射线能量全部沉积,CT值升高,血管和组织



的对比度显著提高。但是,低能射线导致硬化伪影效应增强,背 景噪声增加,降低图像质量;提高射线能量能够弱化硬化伪影, 减少金属伪影的影响,降低背景噪声,但由于康普顿效应增强, 射线能量部分沉积引起ROI内CT值减小,图像SNR和CNR随之降 低。因此,评价图像质量需综合考虑多个参数如CT值、SD值, SNR和CNR等。

早期研究结果表明,为了提高肺动脉栓塞的准确率,动脉增 强期肺动脉的CT值>250 HU可以达到诊断要求^[9],且血管成像 中,CNR>8时血管与周围组织的分辨力才能满足诊断需求^[10]。 Apfaltrer P^[11]用双源CT对肺动脉CTA成像的虚拟单能量与混合能 量进行对比,结果表明最佳单能量水平为70 keV。Li^[9]等人在宝 石能谱CT上对比虚拟单能量与混合能量的多个指标,结果显示 60-65 keV为肺动脉CTA成像最佳单能量范围。本研究所使用的 IOon CT在探测器设计上利用信号符合实现抑制噪声,保证低能 级图像噪声也处于较低的水平,CNR和SNR值相对升高。因此双 层探测器CT呈现的结果与其他能谱CT稍有差异,综合主肺动脉 干, 左/右肺动脉干, 左/右肺下叶动脉的客观及主观评价指标, 最佳成像单能量范围较之前研究有所下降,为50-55 keV,最佳 单能量为50 keV,随能量升高(>55 keV),SNR和CNR逐渐降低, 图像质量下降,肺动脉细小分支逐渐模糊,难以从背景噪声中分 辨。尽管低能量(40 keV,45 keV)肺动脉的CT值较高,但与骨结构 的对比度低,在三维重建中容易被错误识别导致40 keV(3.20分 ±0.18),45 keV(4.10分±0.36)的主观评分明显低于混合能量。 本研究存在一定的局限性: 1)收集的病例数有限,且仅2例肺栓塞 患者,后期我们将继续增加样本量,纳入肺动脉栓塞和畸形等病 例,研究针对不同疾病能谱数据的利用价值;2)未能根据患者的 体重和年龄个性化定制扫描参数和造影剂用量,有文献报道身体 质量指数(Body Mass Index,BMI)的增大导致背景噪声增大^[9],降 低图像质量,虽然本研究中病例无明显肥胖患者,但后期我们将 进一步进行前瞻性研究,收集患者的BMI信息。

综上所述,双层探测器CT可以重建出虚拟单能量图像,相比传统混合能量,虚拟单能量的低能量图像(50-55 keV)在肺动脉

CTA成像中具有更高的SNR和CNR,在三维重建中可以显示更多 肺动脉细小分支的信息。综合评价,虚拟单能量50-55 keV图像质 量最好,其中50keV成像质量最佳。

参考文献

- [1]李波,李平,黄秀秀.256排螺旋CT肺动脉造影诊断肺动脉栓塞的临床价值及其可行 性探讨[J],中国CT和MRI杂志,2021,19(6):65-67.
- [2] 陈航,陈肖华. 双源CT在急性肺动脉栓塞严重程度及右心室功能变化评估中的应用 [J],中国CT和MRI杂志, 2021, 19 (3): 81-83.
- [3] Negin Rassouli, Maryam Etesami, Amar Dhanantwari, et al. Detectorbased spectral CT with a novel dual-layer technology: principles and applications[J]. Insights Imaging, 2017, 8: 589-598.
- [4] Victor Neuhaus, Nuran Abdullayev, Nils Große Hokamp, et al. Improvement of image quality in unenhanced dual-layer CT of the head using virtual monoenergetic images compared with polyenergetic single-energy CT[J]. Comparative Study, 2017, 52 (8): 470-476.
- [5]Zhao Xue-Mei, Wang Man, Wu Run-Ze, et al. Dual-layer spectral detector CT monoenergetic reconstruction improves image quality of non-contrast cerebral CT as compared with conventional single energy CT[J]. European Journal of Radiology, 2018, 103: 131-138.
- [6] 孙奕波,李铭,毛定彪,等.下肢动脉病变能谱CT血管成像图像后处理中最佳单能量 图像的选择[J].中华放射学杂志,2013,47(3):269-272.
- [7] 王茹欣,董越,孙利飞,等. 能谱CT显示肺癌不典型骨转移瘤的图像质量和最佳单能 量水平[J]. 中华放射学杂志, 2015, 49 (3): 164-167.
- [8] Sanjeeva P Kalva, Dushyant V Sahani, Peter F Hahn, et al. Using the K-edge to improve contrast conspicuity and to lower radiation dose with a 16-MDCT: a phantom and human study[J]. J Comput Assist Tomogr, 2006, 30(3): 391-397.
- [9]李又洁,高宗辉,王明超,等.宝石CT肺动脉能谱成像最佳单能量图像的选择[J].胸 部影像学,2018,24:306-310.
- [10] 李原,马会珍,刘燕,等. 256排宽体探测器能谱肺动脉CT最佳单能量成像研究[J]. 宁夏医学杂志, 2020, 42 (3): 241-243.
- [11] Apfaltrer Paul, Sudarski Sonja, Schneider Divid, et al. Value of monoenergetic Low-kV dual energy CT datasets for improved image quality of CT pulmonary angiography[J]. European Journal of Radiology, 2014, 83 (2): 322-328.

(收稿日期: 2021-09-14) (校对编辑: 何镇喜)

78 ·