❖影像技术学

Comparative analysis of two kinds of virtual unenhanced technique of spectral CT and routine plain CT in thorax

WANG Huixia, YUE Songwei*, LYU Peijie, WU Weijie, GAO Jianbo
(Department of Radiology, First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

[**Abstract**] **Objective** To investigate image quality of virtual unenhanced images (VUE) and material suppressed iodine images (MSI) compared with true unenhanced images (TUE), and to explore the application value of virtual unenhanced technique in chest CT scanning. **Methods** Forty patients underwent conventional unenhanced CT and contrast-enhanced CT with spectral imaging mode, and dual-phase enhanced scanning with GSI Assist mode was performed. VUE based on initial data and MSI based on contrast-enhanced images during arterial phase (AP) and venous phase (VP) were generated, respectively. CT values and standard (SD), CNR of thoracic aorta, pulmonary artery, erector spinae muscle and fat and qualitative visual parameters (image quality as graded on a 5-point scale) were compared. Statistical analysis was performed with *One-way* ANOVA, *Mann-Whitney U* test and *Kruskal-Wallis H* tests. **Results** CT value of pulmonary artery and thoracic aorta in AP-MSI were significantly different with those in TUE (both $P<0.005$). Compared with TUE, there was no significant difference of CT value, SD nor CNR in AP-VUE, VP-VUE and VP-MSI (all $P>0.05$). Compared with TUE, qualitative visual parameters had no difference with VP-VUE (all $P>0.005$), which were lower in AP-VUE, AP-MSI and VP-MSI (all $P<0.005$). The radiation dose reduced by 19.29% with VUE compared with TUE. **Conclusion** Using VUE could acquire better image quality than MSI with reducing radiation dose. VP-VUE has similar image quality to TUE, which has potential to replace TUE.

[**Keywords**] thorax; tomography, X-ray computed; virtual unenhanced technique; image quality
DOI:10.13929/j.1003-3289.201812006

对比分析两种胸部能谱 CT 虚拟平扫图像与常规平扫图像

王会霞,岳松伟*,吕培杰,武卫杰,高剑波
(郑州大学第一附属医院放射科,河南 郑州 450052)

[**摘 要**] **目的** 比较虚拟平扫图像(VUE)和抑碘图像(MSI)与常规 CT 平扫图像(TUE)质量,观察能谱 CT 虚拟平扫技术在胸部 CT 成像中的应用价值。**方法** 前瞻性收集 40 例患者行胸部平扫联合增强检查,采用常规扫描模式获得胸部 TUE,以 GSI Assist 模式行双期增强扫描。采用 VUE 技术基于原始数据重建动脉期、静脉期虚拟平扫图像(AP-VUE、VP-VUE),通过后处理抑碘技术获得双期抑碘图(AP-MSI、VP-MSI)。测量胸主动脉、肺动脉、竖脊肌及胸壁皮下脂肪 CT 值及其标准差(SD 值),并计算 CNR,采用 5 分法对图像进行主观评分,以单因素方差分析及 *Kruskal-Wallis H* 法、*Mann-Whitney U* 法进行统计学分析。**结果** AP-MSI 肺动脉及胸主动脉 CT 值与 TUE 比较差异有统计学意义(P 均$<$0.005),VP-MSI 及双期 VUE 各部位 CT 值、CNR 值及 SD 值与 TUE 间差异无统计学意义(P 均$>$0.005)。双期 MSI 及 AP-VUE 图像各项主观评分均低于 TUE(P 均$<$0.005),VP-VUE 图像各项主观评分与 TUE 比较差异均无统计学意义

[**第一作者**] 王会霞(1991—),女,河南濮阳人,在读硕士。研究方向:胸部影像学。E-mail:1508249322@qq.com
[**通信作者**] 岳松伟,郑州大学第一附属医院放射科,450052。E-mail:ysw197281@sina.com
[**收稿日期**] 2018-12-03 [**修回日期**] 2019-06-28

（P 均＞0.005）。虚拟平扫较常规平扫辐射剂量降低 19.29％。**结论**　VUE 技术可在降低辐射剂量的同时获得较 MSI 更好的图像质量，尤其 VP-VUE 与 TUE 图像质量相当，有代替常规胸部平扫的潜能。

［**关键词**］　胸部；体层摄影术，X 线计算机；虚拟平扫技术；图像质量
［**中图分类号**］　R56；R814.42　［**文献标识码**］　A　［**文章编号**］　1003-3289(2019)09-1409-05

虚拟平扫图像（virtual unenhanced images，VUE）是双能 CT 的重要应用之一，以往双源双能 CT 基于混合能量图像进行物质分离，能谱 CT 基于 70 keV单能量图像抑碘获得 VUE[1-2]，图像质量和组织 CT 值均受诸多因素影响而临床应用受限[3-4]。Revolution CT 可基于原始单能量数据通过多物质分离技术联合自适应统计迭代重建算法-V（adaptive statistical iterative reconstruction-V，ASIR-V）获得 VUE。目前鲜见有关 VUE 图像质量及对 VUE 与抑碘图（material suppressed iodine images，MSI）图像质量的比较分析。本研究于能谱 CT 成像后采用 VUE、MSI 技术重建平扫图像，探讨其用于替代常规平扫图像（true unenhanced images，TUE）的可行性。

1　资料与方法

1.1　一般资料　前瞻性收集我院 2018 年 3 月—7 月行胸部平扫联合增强扫描的患者 40 例，男 21 例，女 19 例，年龄 19～85 岁，平均（54.2±14.3）岁，体质量指数（body mass index，BMI）（22.25±5.93）kg/m^2；排除标准：有碘过敏史；年龄小于 18 岁；有严重肝、肾功能损伤。所有患者均签署知情同意书。本研究经本院伦理委员会审核批准。

1.2　仪器与方法　采用 GE Revolution CT 机，常规模式行胸部平扫，GSI Assist 模式行能谱增强扫描。常规模式：管电压 120 kVp，自动管电流技术（100～600 mAs）；能谱模式：管电压 80/140 kVp 瞬时切换，智能匹配管电流技术（200～500 mAs）；噪声指数 13，探测器宽度 80 mm，旋转速度 0.5 秒/周，扫描层厚 5 mm，层间距 5 mm，螺距 0.992∶1。扫描范围自胸廓入口处至肺底层面，对比剂采用碘海醇（350 mgI/ml），剂量 400 mgI/kg 体质量，流率根据对比剂用量设定[5]。

扫描结束采用 40％ ASIR-V 重建获得常规 TUE 及双期能谱增强图像。于主机上基于能谱原始数据，采用 VUE 技术联合 40％ ASIR-V 重建动脉期、静脉期 VUE（AP-VUE、VP-VUE）。将双期能谱增强图像导入 GE HealthCare AW 4.7 工作站，基于双期 70 keV单能图像获得动脉期、静脉期抑碘图（AP-MSI、VP-MSI）。图像重建层厚及层间距均为 1.25 mm。

1.3　图像分析　客观评分：将 TUE、双期 VUE 及双期 MSI 图像导入后处理工作站，将 ROI 置于肺动脉分叉上下层面肺动脉主干、胸主动脉、竖脊肌，记录 CT 值；将 ROI 置于胸壁脂肪测其 CT 值及 CT 值的标准差（SD）[6]；所有 ROI 测量 3 次取均值。采用 compare 功能保证不同图像 ROI 的大小、位置保持一致。计算 VUE、MSI 图像相对于 TUE 的 CT 值差值，计算肺动脉及胸主动脉 CNR：CNR＝（肺动脉或胸主动脉 CT 值－竖脊肌 CT 值）/SD。

主观评分：由 2 名具有 5 年以上工作经验的放射科医师采用盲法阅片，采用 5 分制对所有图像进行主观评分，主要观察纵隔、大血管、胸膜、胸壁、肺段及亚段支气管，评分内容包括图像噪声、解剖细节、图像伪影及总体评分。评分标准[7-8]：5 分（优异），图像解剖细节显示清晰，无明显噪声和伪影；4 分（良好），图像解剖细节显示较清晰，噪声稍增多，伪影较轻，不影响诊断；3 分（中等），图像解剖细节欠清晰，噪声和伪影较明显但可接受；2 分（较差），图像解剖细节辨识困难，噪声和伪影很明显，严重影响诊断；1 分（极差），图像解剖细节无法辨识，噪声和伪影极明显，无法用于诊断。3 分或 3 分以上者为可满足诊断要求。

1.4　辐射剂量　记录平扫及增强扫描 CT 剂量容积指数（volume CT dose index，$CTDI_{vol}$）和剂量长度乘积（dose-length product，DLP），计算有效辐射剂量（effective dose，ED），ED＝k×DLP，k 为转换因子，取值 0.014 mSv/（mGy·cm）[9]。常规平扫辐射剂量为平扫及双期增强扫描辐射剂量之和；虚拟平扫辐射剂量为双期增强扫描辐射剂量之和。

1.5　统计学分析　采用 SPSS 21.0 统计分析软件，计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示，等级资料以中位数（上、下四分位数）［M（$Q1$，$Q3$）］表示。以单因素方差分析比较常规 TUE 和 4 组 VUE 组织 CT 值、CNR 值、SD 值及 4 组 VUE 与 TUE CT 值的差值，采用 *Bonferroni* 法进行两两比较；以 *Kruskal-Wallis H* 法比较图像主观评分，采用 *Mann-Whitney U* 法进行两两比较。采用 *Kappa* 检验比较 2 名医师主观评分一致性，*Kappa* 值≥0.75 表示一致性较好；*Kappa* 值＜0.4 表示一致

性较差。以配对 t 检验比较常规平扫与虚拟平扫辐射剂量。$P<0.05$ 为差异有统计学意义，两两比较以 $P<0.05/N$ 为差异有统计学意义，N 为两两比较次数。

2　结果

2.1　客观图像质量比较　TUE 及 VUE、MSI 图像客观指标比较见表 1。AP-MSI 肺动脉、胸主动脉 CT 值与 TUE 差异有统计学意义（$t=7.697$、11.397，$P<0.005$），余部位 CT 值及各部位 CNR 值、胸壁脂肪 SD 值与 TUE 差异无统计学意义。AP-VUE、VP-VUE 及 VP-MSI 各部位 CT 值、CNR 值及胸部脂肪 SD 值与 TUE 间差异无统计学意义（$t=0.005\sim5.523$，P 均>0.005）。

VUE、MSI 图像相对于 TUE 的 CT 值差值比较见表 2。AP-MSI 和 TUE 间胸主动脉 CT 值差值明显大于 AP-VUE、VP-VUE 及 VP-MSI 图像（$t=5.158\sim8.033$，$P<0.007\ 3$），4 组 VUE 间其余部位 CT 值差值差异无统计学意义。AP-MSI 图像中肺动脉、胸主动脉 CT 值差值>10 HU 的患者占 52.50%（21/40）、55.00%（22/40）；AP-VUE 及 VP-MSI 中 70%以上图像各部位 CT 值差值$\leqslant10$ HU；VP-VUE 中 80%以上图像各部位 CT 值差值$\leqslant10$ HU，见表 3。

2.2　主观质量评分比较　2 名医师图像主观评分具有较好一致性（$Kappa\geqslant0.75$）。TUE 及 4 组 VUE 主观评分比较见表 4。双期 MSI 及 AP-VUE 各项主观质量评分均低于 TUE，差异有统计学意义（$Z=-7.520\sim-6.290$，P 均<0.005），VP-VUE 各项评分与 TUE 比较差异均无统计学意义（$Z=-1.673\sim-0.558$，P 均>0.005）；VUE 图像各项评分均高于 MSI 图像（$Z=-7.390\sim-7.176$，$P<0.005$），VP-VUE 图像各项评分均高于 AP-VUE（$Z=-7.308\sim-6.469$，$P<0.005$），VP-MSI 图像解剖细节评分与 AP-MSI 无差异，其余各项评分均高于 AP-MSI（$Z=-5.267\sim-2.864$，$P<0.005$）。TUE 及 VUE、MSI 图像见图 1。

表 1　常规 TUE 及 VUE、MSI 图像客观指标比较（$\bar{x}\pm s$，$n=40$）

图像	CT 值（HU）				胸壁脂肪 SD 值（HU）	CNR 值	
	肺动脉	胸主动脉	竖脊肌	胸壁脂肪		肺动脉	胸主动脉
TUE	49.23±1.00	45.34±7.55	53.05±8.65	−99.81±14.78	13.51±2.72	0.82±0.57	0.77±0.54
AP-VUE	44.87±8.49	47.10±6.34	47.57±6.97	−96.82±19.27	13.15±2.95	0.58±0.48	0.57±0.20
VP-VUE	45.17±4.77	45.95±4.72	48.12±7.91	−95.75±18.67	12.24±2.79	0.61±0.36	0.61±0.45
AP-MSI	56.93±8.80*	56.73±6.83*	47.53±7.06	−98.07±18.84	13.80±2.75	0.81±0.57	0.77±0.60
VP-MSI	49.47±4.94	49.38±4.62	48.73±8.11	−97.73±18.70	12.77±2.87	0.49±0.43	0.53±0.47
F 值	13.974	20.131	3.113	0.244	1.671	3.063	1.660
P 值	<0.001	<0.001	0.017	0.913	0.159	0.018	0.162

注：*：与同部位 TUE 比较，$P<0.05$

表 2　VUE、MSI 相对于 TUE 的 CT 值差值比较（HU，$\bar{x}\pm s$，$n=40$）

图像	肺动脉	胸主动脉	竖脊肌	胸壁脂肪
AP-VUE	7.96±7.13	6.23±4.27	6.23±4.99	6.29±6.72
VP-VUE	6.90±6.86	3.88±3.97	5.86±4.57	6.06±6.16
AP-MSI	10.54±7.61	11.91±7.30*	6.83±4.25	7.85±7.48
VP-MSI	7.68±9.04	6.75±7.53	7.08±9.01	7.51±6.68
F 值	1.508	11.457	0.305	0.617
P 值	0.215	<0.001	0.822	0.605

注：*：与同部位其余图像的 CT 值差值比较，$P<0.008$

表 3　不同部位 VUE、MSI 相对于 TUE 的 CT 值差值$\leqslant10$ HU 或>10 HU 的分布［例（%），$n=40$］

部位	AP-VUE		VP-VUE		AP-MSI		VP-MSI	
	$\leqslant10$ HU	>10 HU	$\leqslant10$ HU	>10 HU	$\leqslant10$ HU	>10 HU	$\leqslant10$ HU	>10 HU
肺动脉	32(80.00)	8(20.00)	32(80.00)	8(20.00)	19(47.50)	21(52.50)	29(72.50)	11(27.50)
胸主动脉	30(75.00)	10(25.00)	34(85.00)	6(15.00)	18(45.00)	22(55.00)	31(77.50)	9(22.50)
竖脊肌	30(75.00)	10(25.00)	34(85.00)	6(15.00)	30(75.00)	10(25.00)	31(77.50)	9(22.50)
胸壁脂肪	31(77.50)	9(22.50)	33(82.50)	7(17.50)	30(75.00)	10(25.00)	29(72.50)	11(27.50)

表 4　TUE 与 VUE、MSI 图像主观评分比较[M(Q1，Q3)]

项目	图像噪声	解剖细节	图像伪影	总体评分
TUE	4.90(4.70，4.90)	5.00(5.00，5.00)	4.90(4.80，4.90)	4.90(4.83，4.97)
AP-VUE	4.50(4.30，4.60)	4.70(4.70，4.80)	4.30(4.00，4.48)	4.47(4.33，4.60)
VP-VUE	4.90(4.80，4.98)	5.00(4.90，5.00)	4.90(4.80，4.90)	4.90(4.83，4.93)
AP-MSI	3.50(3.20，3.50)	3.60(3.40，3.90)	3.20(3.00，3.20)	3.37(3.28，3.57)
VP-MSI	3.60(3.40，3.88)	3.85(3.60，4.18)	3.55(3.33，3.80)	3.62(3.44，3.90)
χ^2 值	149.323	151.342	157.052	156.000
P 值	＜0.001	＜0.001	＜0.001	＜0.001

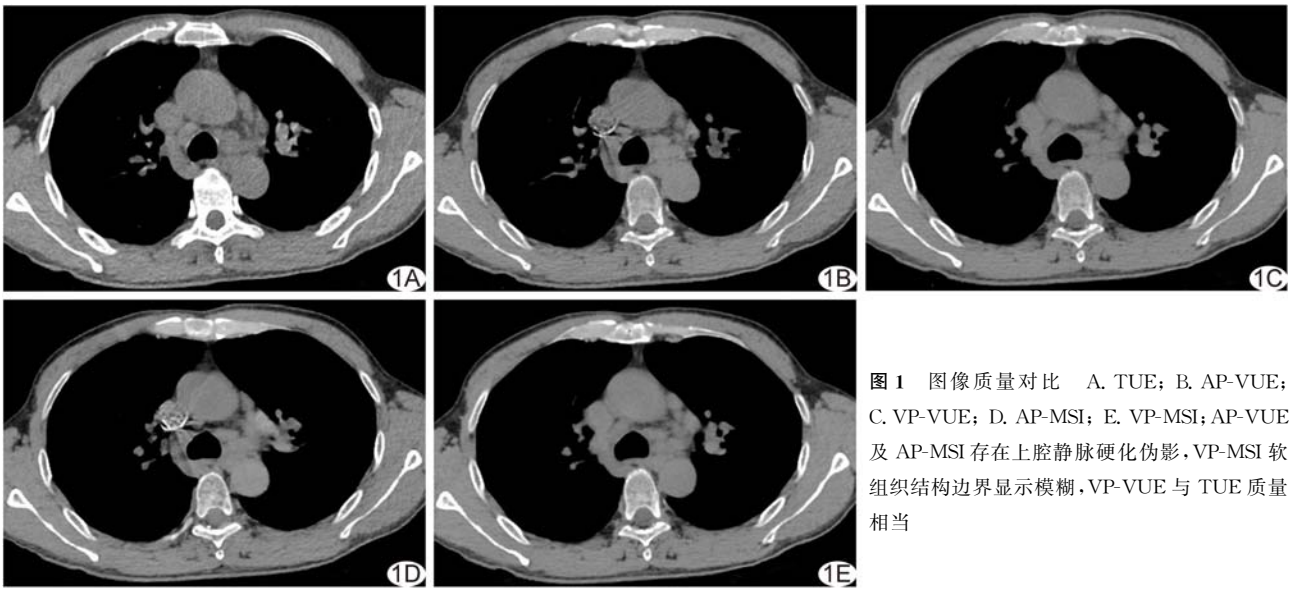

图 1　图像质量对比　A. TUE；B. AP-VUE；C. VP-VUE；D. AP-MSI；E. VP-MSI；AP-VUE 及 AP-MSI 存在上腔静脉硬化伪影，VP-MSI 软组织结构边界显示模糊，VP-VUE 与 TUE 质量相当

2.3　辐射剂量　虚拟平扫 DLP 为(615.67±50.59)mGy·cm，ED 为(8.62±0.71)mSv；常规平扫 DLP 为(762.72±81.64)mGy·cm，ED 为(10.68±1.14)mSv；虚拟平扫较常规平扫辐射剂量降低 19.29%。

3　讨论

双能 CT 基于物质分离技术能获得碘物质分布并将其去除，实现 VUE 重建[10-12]，既往 VUE 均在后处理工作站采用 MSI 软件基于由原始数据重建生成的图像抑碘，而图像重建过程中对原始数据有一定程度修整，对组织碘浓度会产生影响，使得基于修整后的数据进行物质分离存在一定局限性[3-4,13]。理论上，相较于 MSI 技术，Revolution CT 的 VUE 技术基于原始能谱数据提取并抑制碘物质，可消除图像重建对原始数据的处理过程，更准确地获得碘物质分布并进行抑制，后期采用 ASIR-V 迭代算法可提高图像质量[6]。本研究基于这一理论对 TUE、双期 VUE 及双期 MSI 图像质量进行比较。

本研究中，4 种 VUE 各部位 CNR 值与 TUE 间无明显差异。AP-MSI 肺动脉、胸主动脉 CT 值较 TUE 明显增高，考虑动脉期为肺动脉、胸主动脉强化显著期相，血管内含碘量高，易造成物质分离及抑碘不足；而 AP-VUE 各部位 CT 值与 TUE 无明显差异，提示采用 VUE 技术能较 MSI 更精确地抑碘，VP-VUE 及 VP-MSI 各部位 CT 值与 TUE 间无明显差异。本研究双期 MSI 主观评分均低于 TUE，与 Li 等[2]研究结果一致；AP-VUE 主观评分均低于 TUE，VP-VUE 主观评分与 TUE 间无明显差异，考虑原因在于 AP-VUE 存在上腔静脉伪影，对周围组织影响较大，降低整体图像质量。

本研究中 AP-MSI 肺动脉、胸主动脉 CT 值与 VP-MSI、双期 VUE 间有明显差异，VP-MSI 及双期 VUE 间各客观指标均无明显差异。以 10 HU 作为临床诊断的有效误差阈值[14]，4 种虚拟平扫各部位 CT 值与 TUE 各部位 CT 值差值中，80%以上 VP-VUE 图像各部位 CT 值差值≤10 HU，高于 AP-VUE 及双期 MSI 图像，提示采用 VP-VUE 能获得最为接近 TUE 的 VUE。

本研究中 AP-VUE 主观评分低于 VP-VUE，AP-MSI 除解剖细节外，其他主观评分均低于 VP-MSI，考虑原因在于动脉期上腔静脉局部线束硬化伪影明显，在重建中不能完全去除，造成局部伪影重，图像显示欠佳，与刘姝芩等[3,15]的结果相符；双期 VUE 图像各项主观评分分别优于双期 MSI 图像，也证实了采用原始数据抑碘优于重建后图像抑碘的观点。

本研究的不足：样本量较少；未对胸部病变及其细节显示进行分析；只于 Revolution CT 上收集相关病例，未对 VUE 图像与其他机器 VUE 进行比较。

综上所述，胸部 VUE 技术在降低辐射剂量的同时能获得较 MSI 更好的图像质量，尤其 VP-VUE 图像质量与 TUE 相当，具有代替常规胸部平扫图像的潜能，对于临床需要多次复查胸部 CT 检查及胸部急症、配合不佳者有重要意义。

[参考文献]

[1] Yang Y, Jia X, Deng Y, et al. Can virtual non-enhanced CT be used to replace true non-enhanced CT for the detection of palpable cervical lymph nodes? A preliminary study. Jpn J Radiol, 2014, 32(6):324-330.

[2] Li Y, Li Y, Jackson A, et al. Comparison of virtual unenhanced CT images of the abdomen under different iodine flow rates. Abdom Radiol (NY), 2017,42(1):312-321.

[3] 刘姝芩，谢明国，侯中华，等. 胸部 CT 虚拟平扫技术的可行性. 中国医学影像学杂志，2016，24(2)：111-114.

[4] Sahni VA, Shinagare AB, Silverman SG, et al. Virtual unenhanced CT images acquired from dual-energy CT urography: Accuracy of attenuation values and variation with contrast material phase. Clin Radiol, 2013,68(3):264-271.

[5] 吕培杰，柴亚如，阎晓朋，等. CT 能谱智能匹配技术联合自适应统计迭代重组技术对腹部低剂量扫描图像质量和辐射剂量的影响. 中华放射学杂志，2016，50(2)：47-53.

[6] 柴亚如，邢静静，高剑波，等. 多模型迭代重建算法对腹部体模 CT 扫描图像质量和辐射剂量的影响. 中国医学影像技术，2018，34(1)：118-122.

[7] Cornfeld D, Israel G, Detroy E, et al. Impact of adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR) on radiation dose and image quality in aortic dissection studies: A qualitative and quantitative analysis. AJR Am J Roentgenol, 2011, 196(3): W336-W340.

[8] 周悦，董军强，高剑波，等. 能谱 CT 单能量成像联合自适应迭代重建技术优化胸部增强扫描图像质量的研究. 中国医学影像学杂志，2016，24(10)：746-749，754.

[9] European Study Group. European guidelines on quality criteria for computed tomography. Luxembourg: European Commission, 1999:162.

[10] Johnson TR, Krauss B, sedlmair M, et al. Material differentiation by dual energy CT: Initial experience. Eur Radiol, 2007,17(6):1510-1517.

[11] SauterAP, Muenzel D, Dangelmaier J, et al. Dual-layer spectral computed tomography: Virtual non-contrast in comparison to true non-contrast images. Eur J Radiol, 2018,104:108-114.

[12] 江杰，何波，张俊，等. 双源 CT 双能量胸部虚拟平扫的应用价值. 中国医学影像技术，2012，28(4)：791-795.

[13] Barrett T, Bowden DJ, Shaida N, et al. Virtual unenhanced second generation dual-source CT of the liver: Is it time to discard the conventional unenhanced phase? Eur J Radiol, 2012, 81(7):1438-1445.

[14] Borhani AA, Kulzer M, Iranpour N, et al. Comparison of true unenhanced and virtual unenhanced (VUE) attenuation values in abdominopelvic single-source rapid kilovoltage-switching spectral CT. Abdom Radiol (NY), 2017,42(3):710-717.

[15] Imafuji A, Hara M, Sasaki S, et al. Usefulness of dual-energy CT scanning at 80 kVp for identifying hilar and mediastinal structures: Evaluation of contrast enhancement of the pulmonary vessels and lymph nodes. Jpn J Radiol, 2012,30(1):69-77.

文章题名要求

▲题名应以简明、确切的词语反映文章中最重要的特定内容，要符合编制题录、索引和检索的有关原则，并有助于选定主题词。

▲中文题名一般不宜超过 20 个字，必要时可加副题名。

▲英文题名应与中文题名含义一致。

▲题名应避免使用非公知公用的缩写词、字符、代号，尽量不出现数学公式和化学式。