

光谱 CT 头部虚拟平扫图像:不同单能量图像质量的对比

付永春,江滨,周一楠,陈红燕,陈绪珠

【摘要】 目的:探讨双层探测器光谱 CT 不同单能量图像在头部影像诊断中的临床应用效能。**方法:**回顾性分析 2019 年 6—12 月因头晕、晕厥和头痛等临床症状而在本院行光谱 CT (IQon Spectral CT) 头部 CT 平扫检查的 38 例患者的影像资料。从光谱 CT 扫描中可获取常规混合能量图像和 40~120 keV 的光谱成像数据,以 5 keV 为间隔增量将光谱数据重建为 17 组单能级图像。分别测量每组图像上幕上灰质和白质的 CT 值和噪声值(SD),并计算信号噪声比(SNR)和对比信噪比(CNR)。同时对常规图像与 120 keV 单能级图像的伪影区域的脑组织结构(灰、白质)的对比及后颅窝伪影情况进行主观、客观评分和比较。采用 Bonferroni 法进行统计学分析。**结果:**各组单能图像之间脑灰质 CT 值($P < 0.001$)、噪声($P = 0.012$)和 CNR($P < 0.001$)的差异均有统计学意义,而脑白质 CT 值的差异无统计学意义($P = 0.107$)。其中 65 keV 图像的脑灰质 CT 值,脑灰、白质的噪声和 SNR 均高于其它单能级和常规混合能量图像($P < 0.05$),CNR 亦高于其它单能级图像和常规图像($P < 0.05$)。与常规图像比较,120 keV 单能级图像上颅底层面伪影区域的脑灰、白质 CT 值($P = 0.046$)、噪声($P < 0.01$)、SNR($P < 0.001$)和 CNR($P < 0.001$)的差异均具有统计学意义,且图像质量评分($P < 0.001$)和伪影评分($P < 0.001$)的差异亦有统计学意义。**结论:**和常规图像相比,从双层探测器光谱 CT 重建的单能图像在 65 keV 灰、白质对比度好,图像噪声降低、软组织分辨率提高。120 keV 单能级图像在由颅骨引起的 X 线束硬化伪影方面,能有效还原周围组织结构,提升图像质量。

【关键词】 光谱 CT; 体层摄影术, X 线计算机; 单能谱图像; 图像质量

【中图分类号】 R814.42; R742 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2021)04-0546-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.04.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A comparative study of head image quality of virtual monochromatic images at different energy levels on spectral CT FU Yong-chun, JIANG Bin, ZHOU Yi-nan, et al. Radiology Department of Radiology, the Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China

【Abstract】 Objective: To investigate the influence of monoenergetic images of different energy levels in the double-layer detector spectral computed tomography (CT) on the image quality of head. **Methods:** The CT images of 38 patients with dizziness, fainting and headache who underwent head CT examination at a IQon spectral CT scanner from June to December 2019 were retrospective analyzed. The poly-energetic images and monoenergetic images were all reconstructed from the spectral CT data of 40~120 keV. The monoenergetic images were reconstructed into 17 sets with 5 keV interval increments. The CT attenuation and noise of gray and white matter in each group were measured. Signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) were calculated. At the same time, the contrast of the grey and white matter and artifacts in the artifact area of the posterior fossa were subjectively (ie., visual rating) and objectively scored and compared between the conventional images and the monoenergetic images at 120 keV. Bonferroni correction test was used for statistical analysis. **Results:** The differences of the CT values on the monoenergetic images of grey matter ($P < 0.001$), noise ($P = 0.012$) and CNR ($P < 0.001$) were statistically significant among the groups, while the difference of the CT values of the white matter among the groups was not statistically significant ($P = 0.107$). A-

作者单位: 100070 北京,首都医科大学附属北京天坛医院放射科(付永春,陈红燕,陈绪珠),北京市神经外科研究所神经流行病学室(江滨); 100026 北京,飞利浦(中国)投资有限公司 CT(周一楠)

作者简介: 付永春(1973—),男,北京人,副主任医师,主要从事医学影像技术和科研工作。

通信作者: 陈绪珠, E-mail: radiology888@aliyun.com

基金项目: 科技部国家重点研发计划子课题(2018YFC0115604);国家自然科学基金面上项目(81772005);北京市科委协同创新重大专项子课题(Z191199996619088);北京市卫生系统高层次卫生技术人才培养计划(2015-3-042)

mong them, the CT values of grey matter, the noise of grey and white matter and SNR on 65keV monoenergetic images were higher than those on the other monoenergetic and conventional polyenergetic images ($P < 0.05$), and the CNR was higher than that of other monoenergetic images and conventional images ($P < 0.05$). Compared with those on conventional images, the CT values of the gray and white matter ($P = 0.046$), noise ($P < 0.01$), SNR ($P < 0.001$) and CNR ($P < 0.001$) in the artifact area on 120keV monoenergetic images were significantly different. There were significant differences in subjective evaluation on image quality ($P < 0.001$) and artifact score ($P < 0.001$). **Conclusion:** Compared with conventional polyenergetic image, the monoenergetic image at 65keV of the double-layer detector spectral CT has better, grey-white matter contrast, lower image noise and higher resolution on the soft tissue. At 120keV, beam-hardening artifacts on CT images caused by the skull are significantly reduced, which effectively restores the surrounding tissue structure and improves the image quality.

【Key words】 Head; Spectral CT; Tomography, X-ray computed; Monoenergetic image; Image quality

CT 是诊断脑外伤和脑卒中疾病的首选影像检查之一。近年来能谱 CT 技术迅速拓展, 利用其单能量图像来改善不同组织的对比度, 提高图像质量, 扩大 CT 在头颈部和神经系统的应用范围^[1-5]。能谱 CT 的显著特征是实现了多参数的诊断, 相比常规混合能量 CT 其具有更高的信噪比和更低的图像噪声^[6]。与以往能谱 CT 不同, 近期进入临床应用的双层探测器光谱 CT 具备独特的上下两层探测器结构, 分别接收低能量和高能量 X 射线光子, 这样就可以在一次常规扫描中同时获取混合能量的常规影像和高-低能量分离的光谱影像^[2, 7-15]。

本研究通过对比双层探测器光谱 CT 头部平扫的虚拟单能图像和常规混合多能量图像, 旨在探讨最佳单能量图像在优化图像质量、增加灰白质对比度及减少由颅骨造成的线束硬化伪影等方面的价值。

材料与方法

1. 资料与分组

回顾性分析 2019 年 6—12 月因头晕、晕厥及头痛等原因在本院行头部 CT 平扫检查的 38 例患者的临床和影像资料。其中, 女 17 例, 男 21 例, 年龄 7~88 岁, 平均 (41.3 ± 19.4) 岁。排除标准: ①有金属植入物; ②图像上有明显运动伪影; ③影像学检查显示有脑出血、脑梗死、脑萎缩和明显颅内占位; ④进行过开颅手术或其它原因引起的脑结构严重变形, 影响数据的测量。

2. 扫描和重建方法

使用 Philips IQon 双层探测器光谱 CT 机。患者取仰卧体位, 扫描范围自颅底至颅顶, 扫描参数: 120 kV, 300 mA, 螺距 0.390, 0.58 s/r; 重建层厚 1.0 mm, 层间距 1.0 mm, 卷积核 UB。分别使用 iDose4 Level 3 和 Spectral Level 3 迭代水平进行常规

图像和光谱图像的薄层重建。单能量光谱重建的能级水平: 在 40~120 keV 范围内以 5 keV 间隔进行重建图像, 共获得 17 组单能级图像。

3. 图像质量评价

将所有图像传输至 IntelliSpace Portal (ISP) V9 工作站进行分析和后处理。所有图像采用相同的窗宽 (70 HU) 和窗位 (35 HU)。图像质量的客观评估由 2 位分别具有 10 年和 15 年以上工作经验的神经方向影像科技师完成。首先, 在基底节层面的脑灰质和脑白质区域放置 ROI (region of interest, ROI), 尽量选择密度比较均匀的区域, 测量 ROI 的 CT 值和标准差 (standard deviation, SD), 以其 SD 作为图像噪声, 计算 ROI 的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 和脑白质 (white matter, WM) 与脑灰质 (gray matter, GM) 之间的对比噪声比 (CNR)^[2]:

$$\text{SNR} = \frac{\text{灰质(白质)的 CT 值}}{\text{SD}} \quad (1)$$

$$\text{CNR} = \frac{\text{CT 值}_{\text{GM}} - \text{CT 值}_{\text{WM}}}{\text{SD}} \quad (2)$$

其次, 在伪影最大的颅底层面选择 2 个位置勾画 ROI, 1 个位于射线硬化伪影最重的区域, ROI 大小应小于伪影范围, 第 2 个位于没有伪影干扰的区域 (作为参照), 分别测量其 CT 值和 SD。

图像质量的主观评价: 由 2 位分别具有 10 年和 15 年以上神经影像诊断经验的医师采用单盲法 (对扫描机型和重建参数均不知情, 且不参与后续的分析) 对图像质量和伪影进行主观评价。对图像质量的评分采用 4 级评分法, 意见不同时经协商达成一致意见。评分标准^[2]: 1 分, 图像质量优良, 组织周围对比度好, 脑部的灰白质界限分明显示好, 图像噪声微小; 2 分, 图像质量良, 组织周围对比度好, 脑部的灰白质界限较分明显示较好, 图像噪声较小; 3 分, 图像质量不好, 组织

周围对比度欠佳,脑部的灰白质界限分明显示不清晰,图像噪声较大;4 分,图像质量差,组织周围对比度差,脑部的灰白质界限无法分辨,图像噪声大。对图像伪影的评分亦采用 4 分法^[2]:1 分,无伪影显示;2 分,显示有少量伪影;3 分,较多伪影,对评价周围的组织结构有一定干扰;4 分,有明显伪影,影响对周围组织结构的观察,无法进行正确诊断。

4. 统计学方法

使用 IBM SPSS Statistics 21.0 软件进行统计学分析。计量资料采用均数±标准差表示。对 CT 值、SD、SNR 和 CNR 的组间比较采用 Bonferroni 法,进一步两两比较采用 LSD-t 检验(方差齐)或 Dunnett's T3 法(方差不齐)。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义(双侧检验)。

结 果

1. 图像质量的客观评价

各单能级图像及常规混合能量图像的各项客观评价指标值及组间比较结果见表 1~2。各组图像之间脑白质 CT 值的差异无统计学意义($F=1.450, P=0.107$);而各组图像之间脑灰质 CT 值($F=159.625, P<0.001$)、灰质噪声($F=1.963, P=0.012$)和 CNR ($F=16.514, P<0.001$)的差异均有统计学意义。65keV 图像的 CNR 高于其它单能级图像和常规混合能量图像,组间差异大部分具有统计学意义($P<0.05$),详见表 2。

2. 硬化性伪影的客观评价

与常规图像相比,在单能级图像上颅底伪影的

表 1 各组中灰质和白质图像质量客观评价指标值

图像类型	白质 CT(HU)	灰质 CT(HU)	灰质 SD(HU)	CNR
40keV	27.37±4.03	49.88±4.50	3.27±1.14	6.27±2.92
45keV	27.04±3.12	45.91±3.53	3.02±1.05	5.40±2.26
50keV	26.77±2.40	42.99±2.79	2.89±1.00	5.00±2.12
55keV	26.57±2.08	40.45±2.31	2.76±0.94	4.40±1.84
60keV	26.60±2.49	38.53±2.52	2.65±0.90	4.18±1.80
65KeV	26.31±1.69	37.26±1.75	2.61±0.90	3.79±1.64
70keV	26.22±1.70	36.27±1.65	2.58±0.89	3.52±1.59
75keV	26.13±1.76	35.38±1.641	2.55±0.88	3.26±1.54
80keV	26.09±1.79	34.62±1.61	2.53±0.87	3.09±1.49
85keV	26.05±1.83	34.12±1.63	2.49±0.87	2.92±1.46
90keV	26.03±1.20	33.67±1.58	2.51±0.88	2.78±1.43
95keV	25.93±1.97	33.31±1.68	2.48±0.88	2.72±1.43
100keV	25.90±1.97	33.07±1.60	2.48±0.86	2.66±1.38
105keV	25.90±2.02	32.68±1.64	2.50±0.86	2.53±1.37
110keV	25.88±2.03	32.52±1.72	2.48±0.86	2.50±1.39
115keV	25.91±2.05	32.32±1.71	2.46±0.84	2.43±1.36
120keV	25.88±2.07	31.43±5.12	2.74±2.01	2.43±1.37
常规图像	26.26±1.82	36.40±1.78	2.38±0.84	3.76±1.53

表 2 65KeV 图像与其它单能级图像和常规图像质量客观评价指标的比较

图像类型	灰质噪声(HU)	P 值	白质噪声(HU)	P 值	灰质 SNR	P 值	白质 SNR	P 值	CNR	P 值
常规图像	2.38±0.84	0.316	3.07±1.33	0.781	16.57±4.96	0.606	10.31±4.60*	0.023	3.76±1.53	0.949
40keV	3.27±1.14*	0.040	4.05±1.10*	0.002	17.24±6.57	0.289	7.36±2.60*	0.012	6.27±2.92	<0.001
45keV	3.02±1.05	0.079	3.76±1.00*	0.040	17.10±6.17	0.342	7.75±2.43	0.059	5.40±2.26	<0.001
50keV	2.89±1.00	0.236	4.14±4.07*	0.001	16.73±5.91	0.515	8.86±4.03	0.936	5.00±2.12	0.002
55keV	2.76±0.94	0.523	3.41±0.89	0.376	16.44±5.91	0.678	8.33±2.49	0.348	4.40±1.84	0.120
60keV	2.65±0.90	0.882	3.22±0.85	0.802	16.36±5.69	0.724	8.83±2.38	0.890	4.18±1.80	0.319
65KeV	2.61±0.89	—	3.15±0.83	—	15.93±5.36	—	8.91±2.35	—	3.79±1.64	—
70keV	2.58±0.88	0.873	3.13±0.83	0.943	15.75±5.23	0.887	8.95±2.39	0.952	3.52±1.59	0.501
75keV	2.55±0.88	0.784	3.12±0.83	0.929	15.52±5.26	0.743	8.92±2.35	0.986	3.26±1.54	0.182
80keV	2.53±0.87	0.733	3.05±0.79	0.734	15.46±5.57	0.706	9.10±2.36	0.761	3.09±1.49	0.074
85keV	2.49±0.87	0.600	3.03±0.77	0.694	15.27±4.95	0.598	9.12±2.35	0.737	2.92±1.46	0.027
90keV	2.51±0.88	0.657	3.05±0.79	0.740	15.07±5.19	0.491	9.09±2.42	0.771	2.78±1.43	0.010
95keV	2.48±0.88	0.553	3.01±0.78	0.629	15.13±5.15	0.521	9.17±2.35	0.677	2.72±1.43	0.007
100keV	2.48±0.88	0.553	2.97±0.76	0.549	15.01±4.96	0.462	9.26±2.35	0.575	2.66±1.38	0.004
105keV	2.50±0.86	0.616	2.96±0.76	0.519	14.62±4.94	0.294	9.31±2.37	0.524	2.53±1.37	0.001
110keV	2.48±0.86	0.577	2.95±0.77	0.496	14.57±5.00	0.275	9.32±3.37	0.506	2.50±1.39	0.001
115keV	2.46±0.84	0.494	2.93±0.77	0.458	14.71±4.92	0.329	9.40±2.37	0.431	2.43±1.36	0.001
120keV	2.74±2.01	0.583	2.91±0.78	0.421	14.50±5.20	0.249	9.46±2.45	0.379	2.43±1.37	0.001
均值	2.63±1.02	0.012	3.22±1.32	<0.001	15.67±5.41	0.417	8.97±2.72	0.003	3.54±2.01	<0.001

注:* 与 65keV 组比较,差异具有统计学意义($P<0.05$)

CT 值、噪声、SNR 和 CNR 均较低,尤其是 120 keV 单能级图像上,2 组间差异均有统计学意义($P<0.05$),详见表 3。

表 3 常规图像与 120keV 单能图像硬化伪影区域的客观评价

指标	常规图像	120keV 图像	P 值
CT 值(HU)	23.66±6.14	28.04±2.96	0.046
SD(HU)	3.21±1.33	2.91±0.78	<0.001
SNR	10.32±4.60	9.46±2.45	<0.001
CNR	3.78±1.57	2.46±1.39	<0.001

3. 图像质量的主观评价

在伪影干扰较重的颅底层面,120 keV 单能级图像的图像质量评分和伪影评分均高于常规混合能量图像(表 4、图 1),差异均有统计学意义影像($P<0.001$)。

表 4 颅底常规图像和单能 120keV 图像的主观影像质量评估

指标	常规图像	120keV 图像	P 值
图像质量评分	3(1,4)	2(1,4)	<0.001
伪影评分	3(1,4)	1.5(1,4)	<0.001

注:表格内数据为中位数(上、下四分位数)。

讨 论

CT 是最常用的影像学检查手段之一,具有安全、快捷和准确性较高等诸多优点^[11]。能谱 CT 成像的最大优势是能够获得虚拟平扫图像,不再是仅仅基于形态学的诊断模式^[12]。双层探测器光谱 CT 将能谱从探索阶段推至真正的临床应用,发挥出能谱技术的独特作用。光谱 CT 的常规扫描可同步获得光谱结果,通过多模态光谱数据,提高颅内组织的分辨率,同时得到形态学和功能信息,可快速获得全面诊断信息,单次扫描的诊断效能明显提高,是神经系统检查的新型综合诊断平台^[13-14]。

光谱 CT 图像的常规解剖图像是由所有患者的上层原始数据和下层原始数据的总和生成的。将底层和

上层的原始数据分别分解成光电和康普顿散射图,并将其重建为光谱基图,从而得到所有的光谱结果。由于光谱数据的获取依赖于双层探测器而非 X 线管,因此无需特殊模式即可在一次扫描中获得光谱结果。所有的光谱结果显示的方式与我院使用的 GE 公司的后处理软件(ADW4.6)处理后的常规 CT 图像相同。虚拟单能图像是用于回顾性光谱分析的光谱图像。在虚拟单能图像上,每个图像序列都是在一个能量级别获得的,该能量级别由一个值表示,范围从 40 keV 到 200 keV。虚拟单能图像的质量和图像特点会随着 keV 值的变化而变化,即使在图像的窗宽和窗位等条件不变的情况下^[11]。因此无需增加辐射剂量即可获得虚拟单能图像。

研究表明,能谱 CT 在分解物质成分和提高影像质量方面比常规 CT 具有明显的优势^[13]。高 keV 单能重建图像能最大限度的降低射线束硬化伪影的干扰,清晰显示伪影周围得组织结构^[15]。光谱 CT 单能成像和常规 CT 图像相比噪声更低、对比噪声比(CNR)更高,在显示物质衰减特征方面更加准确;及能测量消除伪影后的更接近准确的 CT 值^[16]。Noguchi 等^[17]研究显示,能谱 CT 技术的运用有助于提高临床医师的在脑部疾病方面的诊断能力。有利于疾病的鉴别诊断,是 CT 成像的发展方向。

在头部 CT 检查中最常见的后颅窝伪影,经常会影响临床医生的正确诊断并可能造成误诊或漏诊^[18]。后颅窝伪影通常由设备、物理因素和不同重建算法以及患者本身因素所导致,其中以射束硬化引起的伪影影响最大,例如亨氏暗区呈低密度,主要是因为混合能量 X 线照射时,低能量射线易于被物质吸收衰减所致,通常通过软件计算代偿和硬件改良来加以解决^[19-21]。

因颅内结构和组织对比分辨率较低,例如脑灰白质之间的密度差异仅 5~10 HU,所以在常规扫描中采用的 5~10 mm 层厚的图像上,由于受部分容积效应等因素的影响,对于微小病灶的评估有较大限度,这也一直是 CT 在颅脑病变应用方面的瓶颈。Nakaura 等^[22]的研究结果显示,层厚 1.0 mm 的薄层 CT 图像能很好地显示颅内微小病灶。

本研究结果显示:光谱 CT 获得的不同能级的单能量头部图像中,65 keV 单能级图像的质量显著优于常规图像,脑组织结构显示更清晰,同时 CNR 更低,图像噪声更小;而在 120 keV 单能级薄层图像上,射线束硬化伪影较常规图

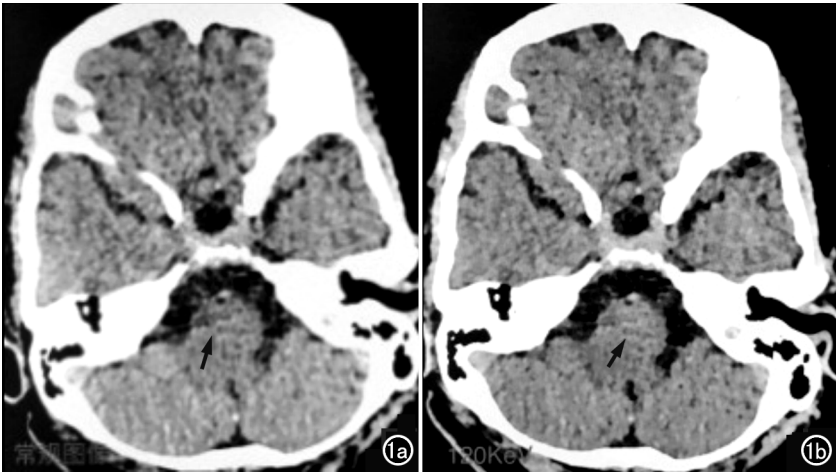


图 1 颅底层面 CT 图像,单能 120kev 图像上由颅骨引起的 X 线束硬化伪影(箭)较常规混合能量图像明显减少。a)常规图像;b)120 keV 图像。

像明显降低。而在组织结构和伪影对比度方面,单能级图像与常规图像之间的差异无统计学意义。因此,笔者认为在临床实践中,光谱 CT 的 65 keV 单能量图像可以作为首选,应用于头部 CT 的临床诊断。

本研究存在的不足之处:(1)患者的样本量有限;(2)没有进一步分析其它能级图像对图像质量的影响和改善情况。

综上所述,与常规重建薄层图像相比双层探测器光谱 CT 薄层重建的 65 keV 单能图像能够更好改善图像质量,优化灰、白质的对比度,降低射线光束强度。同时在 120 keV 单能薄层图像中头部平扫 CT 的射线硬化伪影明显减少了。在不增加任何辐射剂量的情况下,显著提高了图像的影像质量,丰富了临床诊断医师对微小病灶检出的分析诊断信息和图像处理方法,能有效提高微小病灶的诊断准确性,同时增加了临床医师的诊疗信心,在神经系统的检查中可推广使用。

参考文献:

- [1] Bamberg F, Dierks A, Nikolaou K, et al. Metal artifact reduction by dual energy computed tomography using monoenergetic extrapolation[J]. Eur Radiol, 2011, 21(6): 1424-1429.
- [2] 王曼, 王怡宁, 吴润泽, 等. 能谱探测器 CT 单能谱成像在脑部平扫 CT 中应用价值的研究[J]. 国际医学放射学杂志, 2018, 41(2): 125-129.
- [3] Zhao LQ, He W, Li JY, et al. Improving image quality in portal venography with spectral CT imaging[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(6): 1677-1681.
- [4] Grams AE, Knoeflach M, Rehwald R, et al. Residual thromboembolic material in cerebral arteries after endovascular stroke therapy can be identified by dual-energy CT[J]. AJNR, 2015, 36: 1413-1418.
- [5] Potter Christopher A, Sodickson Aaron D. Dual-energy CT in emergency neuroimaging: added value and novel applications[J]. Radiographics, 2016, 36(7): 286-2198.
- [6] 赵晓薇, 潘自来, 吴华伟, 等. 能谱 CT 在中晚期肺癌疗效评估中的应用[J]. 放射学实践, 2020, 35(6): 813-815.
- [7] Pomerantz SR, Kamalian S, Zhang D, et al. Virtual monochromatic reconstruction of dual-energy unenhanced head CT at 65~75keV maximizes image quality conventional polychromatic CT[J]. Radiology, 2008, 247(2): 318-325.
- [8] Johnson T, Fink C, Schonberg SO, et al. Dual energy CT in clinical practice[J]. Med Phys, 2011, 155(2): 133-133.

- [9] Furlan AJ, Whisnant JP, Elveback LR. The decreasing incidence of primary intracerebral hemorrhage: a population study[J]. Ann Neurol, 1997, 28(1): 214-218.
- [10] Duan X, Arbique G, Guild J, et al. Quantitative evaluation of a spectral CT scanner in a phantom study: results of spectral reconstructions[J]. Med J Phys, 2016, 43(7): 3836-3837.
- [11] Cho SB, Baek HJ, Ryu KH, et al. Initial clinical experience with dual-layer detector spectral CT in patients with acute intracerebral haemorrhage: a single-centre pilot study[J/OL]. PLoS One, 2017, 12(11): e0186024. DOI: ???.
- [12] 项改生, 姜增誉, 何生, 等. 能谱 CT 肝癌诊疗研究[J]. 放射学实践, 2020, 35(6): 810-812.
- [13] 陈良新, 朱玉娟. 能谱 CT 多参数分析在评估肺癌病例分型中的应用价值[J]. 中国 CT 和 MR 杂志, 2019, 17(8): 68-71.
- [14] Wang D, Zhang QW, Hu HJ, et al. Optimal contrast of cerebral dual-energy computed tomography in patients with spontaneous subarachnoid hemorrhage[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40(1): 48-52.
- [15] Hixson HR, Leiva-Salinas C, Sumer S, et al. Utilizing dual energy CT to improve CT diagnosis of posterior fossa ischemia[J]. J Neuroradiol, 2016, 43(5): 346-352.
- [16] Yu L, Christner JA, Lenq S, et al. Virtual monochromatic imaging in dual-source dual-energy CT: radiation dose and image quality[J]. Med Phys, 2011, 38(12): 6371-6379.
- [17] Noguchi K, Itoh T, Naruto N, et al. A novel imaging technique (X-map) to identify acute ischemic lesions using noncontrast dual-energy computed tomography[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2017, 26(1): 34-41.
- [18] Danad I, Fayad ZA, Willemink MJ, et al. New applications of cardiac computed tomography: dual-energy, spectral and molecular CT imaging[J]. JACC Cardio Vasc Imaging, 2015, 8(6): 710-723.
- [19] 顾卫彬, 高培毅, 武春雪, 等. 宝石能谱计算机断层扫描 70keV 单能量图像在后颅窝成像中应用的探讨[J]. 中国卒中杂志, 2013, 8(2): 87-95.
- [20] Keat N. Artifacts in CT recognition and avoidance[J]. Radiographics, 2004, 24(6): 1679-1691.
- [21] 周泽俊, 胡永胜, 高斌, 等. 多层螺旋 CT 图像伪影的分析[J]. 中国 CT 和 MR 杂志, 2008, 6(5): 72-73.
- [22] Nakaura T, Iyama Y, Kidoh M, et al. Comparison of iterative model, hybrid iterative, and filtered back projection reconstruction techniques in low-dose brain CT: impact of thin-slice imaging[J]. Neuroradiology, 2016, 58(3): 245-251.

(收稿日期: 2020-08-20 修回日期: 2020-12-24)