

论 著

## 双源CT虚拟单能量成像去除椎弓根螺钉金属伪影的应用研究\*

欧阳丹妮<sup>1</sup> 曾仁华<sup>2</sup> 姜智能<sup>2</sup>  
陶 兰<sup>2</sup> 陈宗桂<sup>2,\*</sup>

1.陆军军医大学第二附属医院(重庆400037)

2.湖南医药学院(湖南怀化418000)

**【摘要】目的** 双源CT虚拟单能量成像(VMI)技术在消除椎弓根螺钉金属伪影方面具有显著的应用价值,本研究选择伪影最严重层面上四个不同的位置,从伪影指数和对比度噪声比方面探讨双源CT虚拟单能量成像技术消除椎弓根螺钉金属伪影的应用价值。**方法** 纳入48例行双源CT检查椎弓根螺钉植入情况的患者,获得14组(60~190keV,间隔10keV)虚拟单能量图像和1组(140kVp)混合能量图像,测量金属植入物周围的4个感兴趣区和同一层面1个脂肪兴趣区的CT值和标准差,并算出伪影指数和对比度噪声比。针对伪影严重程度及金属周围组织清晰度进行主观评分。比较不同图像伪影指数、对比度噪声比和主观评分差异,评估VMI去除金属伪影的价值。**结果** 随着keV的增加,各感兴趣区的伪影指数减小,而对比度噪声比增加。能级110~190keV时伪影指数均低于140kVp图像,且差异有统计学意义( $P<0.05$ )。能级110~190keV时各个感兴趣区的对比度噪声比均高于140kVp混合式能量图像,且差异有统计学意义( $P<0.05$ )。主观评分方面,110~150keV图像评分高于140kVp图像,且差异有统计学意义( $P<0.05$ )。**结论** 双源CT单能量成像技术可有效减少脊柱螺钉内固定后金属伪影的影响,能级110~150keV的单能量图像伪影指数低和对比度噪声比高,并且主观评价显示伪影消除效果良好,是消除椎弓根螺钉金属伪影的最佳单能量值。

**【关键词】** 双源CT; 单能量成像; 金属伪影; 椎弓根螺钉

**【中图分类号】** R814.3

**【文献标志码】** A

**【基金项目】** 湖南省自然科学基金面上项目(2019JJ140202);

湖南省教育厅一般项目(22C1183);

2023年湖南省大学生创新创业

训练一般项目-4537

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.07.051

# Application of Dual-source CT Virtual Single-energy Imaging to Remove Metal Artifacts in Pedicle Screws\*

OUYANG Dan-ni<sup>1</sup>, ZENG Ren-hua<sup>2</sup>, JIANG Zhi-neng<sup>2</sup>, TAO Lan<sup>2</sup>, CHEN Zong-gui<sup>2,\*</sup>.

1.The Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China

2.Hunan University of Medicine, Huaihua 418000, Hunan Province, China

### ABSTRACT

**Objective** Dual-source CT virtual single-energy imaging (VMI) technique has significant application value in eliminating pedicle screw metal artifacts. In this study, we selected four different positions on the most severe level of artifacts, and explored the application value of dual source CT virtual single energy imaging technology in eliminating metal artifacts of pedicle screws from the aspects of artifact index and contrast-to-noise ratio. **Methods** Forty-eight patients who underwent dual-source CT examination of pedicle screws were included. Fourteen groups (60 ~ 190keV, interval 10keV) of monochromatic energy images and one group (140kVp) of mixed energy images were obtained. The CT values and standard deviations of four regions of interest around the metal implant and one fat region of interest at the same level were measured, and the artifact index and contrast signal-to-noise ratio were calculated. Subjective scoring was performed on the severity of artifacts and the clarity of the surrounding tissue of the metal. The difference of different image artifacts index, signal-to-noise ratio and subjective score were compared to evaluate the value of VMI in removing metal artifacts. **Result** The artifact index decreased and contrast signal-to-noise ratio increased of each region of interest with the increase of keV. When the energy level was 110-190keV, the artifact index was lower than that of 140 kVp image, and the difference was statistically significant ( $P<0.05$ ). The contrast signal-to-noise ratio of each region of interest at 110-190keV was higher than that of 140kVp hybrid energy image, and the difference was statistically significant ( $P<0.05$ ). The score of 110-150keV images was higher than that of 140kVp images, and the difference was statistically significant ( $P<0.05$ ) in terms of subjective evaluation. **Conclusion** Dual-source CT single energy imaging technology can effectively reduce the influence of metal artifacts after spinal screw internal fixation. Single-energy images with energy levels of 110 to 150 keV have low artifact indices and high contrast-to-noise ratios, and subjective evaluations show good artifact elimination, making them the best single-energy values for eliminating metal artifacts from pedicle screws.

**Keywords:** Dual-source CT; Single Energy Imaging; Metal Artifacts; Pedicle Screw

腰椎椎弓根螺钉内固定术因稳定性高、创伤较小、恢复较快和脊柱畸形矫正效果良好等优点在临床上得到了广泛的应用。由于L1~5椎间孔的血管、韧带和神经及其毗邻关系复杂,它们相互交织,共同维持着脊柱的稳定性和生理功能。这种复杂的毗邻关系为手术操作带来了极大的难度和风险。若金属螺钉在腰椎内的固定效果不理想,未能达到预期的稳定性和精确性,可能直接压迫椎间孔中的脊神经,导致神经功能障碍,故需对内固定螺钉植入情况进行评估<sup>[1-3]</sup>。但是,金属植入物产生的硬化效应会对CT图像质量造成严重影响,甚至影响对植入物位置、周围骨折或软组织炎症的区分。双源CT成像技术是一种新型金属伪影消除技术,可有效克服硬化效应并显著消除CT金属伪影。先前研究表明,双源CT的虚拟成像技术可以有效抑制金属伪影<sup>[4-6]</sup>。但是,对于抑制腰椎椎弓根金属伪影最佳单能量级存在争议。因此,本研究基于不同虚拟单能量图像(60keV~190keV)上四个感兴趣区域的伪影指数与对比度噪声比和140kVp常规图像上相同层面上四个相同区域进行对比分析,探讨不同虚拟单能量对椎弓根螺钉周围不同部位的影响,从而得出消除腰椎椎弓根螺钉金属伪影的理想单能量级。

### 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 对我院2022年1月至2023年5月,48例腰椎螺钉内固定患者的影像信息资料进行了回顾性分析。其中男性25例,女性23例,年龄分布在18至65岁之间,平均年龄为44.8±25.3岁。纳入标准:所有植入金属螺钉均位于腰椎区域,术后患者的各项生命体征均保持稳定。对于患有严重骨质疏松或存在其他植入物的患者,需要排除其合并腰椎肿瘤的可能性。

**1.2 研究方法** 利用Siemens Force双源CT扫描仪行腰椎扫描,采用管电压瞬时切换技术,在短时间内实现了80kVp/140kVp高低能量之间的周期性快速动态切换产生两束不同能量的X线,从而在螺旋扫描模式下探测器采集两组不同能量数据。整个螺旋扫描容积中的层面平均剂量(CTDIvol)为25.30mGy。双源CT的扫描参数设置:螺距为0.5,管电压80kVp/140kVp快速切换,管电流采用自动调制技术,确保在扫描过程患者的辐射剂量低于人体的安全剂量,准直器宽度为64×0.625mm,扫描层厚和层间隔厚度均为3mm,图像矩阵为512×512pixel。

**1.3 图像重组方法** 扫描所得横断位图像发送到图像后处理工作站,使用双源CT专门

**【第一作者】** 欧阳丹妮,女,影像技师,主要研究方向:虚拟单能量成像对金属伪影的抑制效果。E-mail: 1132077611@qq.com

**【通讯作者】** 陈宗桂,男,讲师,主要研究方向:CT图像金属伪影的抑制。E-mail: zonggui1129@163.com

的软件对采集的数据后处理分析。双源CT采集1组常规140kVp混合能量图，扫描层厚为3mm，扫描层间隔为3mm，扫描螺距为0.5。在图像后处理工作站以10 keV为增量重建，获得60~190 keV虚拟单能量图像，共14组图像。

**1.4 图像分析** 对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)是一种衡量图像质量的指标，它可以表示图像的纹理复杂程度，即模糊与噪声的比例。图像的纹理复杂程度即图像的信息量。因此，CNR是一种用于评估图像信息量的指标。而伪影指数(artifact index, AI)是表征金属伪影严重程度，是反映CT图像失真程度的一个物理量。因此，本研究以140kVp常规图像作为参考图像，对比分析140kVp常规图像和虚拟单能量图像上的4个感兴趣区域的伪影指数及对比度噪声比之间的差异，同时在相同层面上选择不受金属伪影影响的脂肪组织作为参考区域，如图1所示。(1)椎体前部的低密度区域；(2)腰大肌；(3)金属螺钉左右外侧部的组织区域；(4)金属螺钉长轴后方的低密度区域，参考区域选择不受金属伪影影响的区域，如脂肪组织。为保证实验结果的准确性，在140kVp常规图像与不同的虚拟单能量图像所选择的感兴趣区域为同一区域，感兴趣区域大小一致(约为1cm<sup>2</sup>)。为了保证所有CT图像的测量条件相同，选择窗宽/窗位分别是2500Hu/350Hu。选择测量伪影最严重层面的4个感兴趣区域的CT值和标准差(SD)，并以同一层面相同位置脂肪区域为参考背景，测量勾画ROI的CT值、标准差(SD)，计算CNR和AI(见公式1和2)。

$$CNR = \frac{|CT_{location} - CT_{fat}|}{\sqrt{SD_{location}^2 + SD_{fat}^2}} \quad (1)$$

$$AI = \sqrt{SD_{location}^2 - SD_{fat}^2} \quad (2)$$

其中，SD<sub>location</sub>是金属伪影最严重层面内感兴趣区域的SD值，SD<sub>fat</sub>是相同层面内脂肪的SD值。

若SD<sub>location</sub><SD<sub>fat</sub>时，则AI值等于0。若AI值越小，说明金属伪影产生的放射状伪影对图像分辨率影响越小。计算常规采集图像和不同能级的图像的AI值和CNR值。

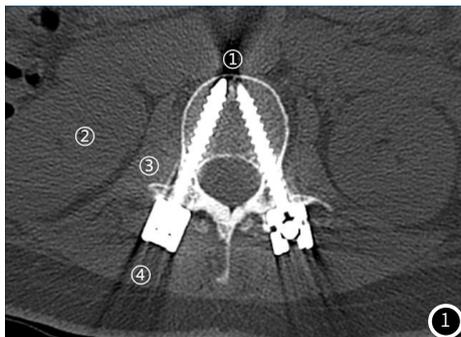


图1 椎弓根螺钉周围的4个感兴趣区域所在位置。  
注：(1)椎体前部的低密度区域；(2)腰大肌；(3)金属螺钉左右外侧部的组织区域；(4)金属螺钉长轴后方的低密度区域。

图像质量主观视觉评价：由2名高年资的放射科医师采用双盲法独立完成。主观视觉评分从椎体周围肌肉的显示、椎体与软

组织间隙的显示、椎体周围软组织、螺钉的植入细节以及CT金属伪影对组织密度分辨率影响的严重程度等方面对CT图像进行评估。CT图像主观评价采用五分量表法，5分没有伪影，图像质量好；4分存在伪影程度小，图像分辨率较好；3分存在伪影程度较小，但不影响金属植入物及周围组织的评价；2分伪影严重，仍可以观察组织大致结构；1分伪影非常严重，金属植入物畸变严重，图像模糊难以辨认。在CT图像上，设置骨窗的窗宽/窗位为2500Hu/350Hu和软组织窗的窗宽/窗位为350Hu/20Hu。

**1.5 统计学处理** 利用SPSS 22.0软件对CT图像数据进行统计分析，通过配对样本t检验比较140kVp混合式能量图像与虚拟单能量图像在伪影指数及对比度噪声比上的差别。主观评分通过Wilcoxon秩和检验对比140kVp图像和单能量图像在主观评分上的区别，通过Kappa进行一致性检验分析2种评价结果之间是否具有一致性。当Kappa值在区间0.0~0.20之间时，说明评价结果一致性很低；在区间0.21~0.40之间，说明评价结果具有一般一致性；在区间0.41~0.60之间，说明评价结果具有中等一致性；在区间0.61~0.80说明评价结果存在高度的一致性和在区间0.81~1表示评价结果存在几乎完全一致。

## 2 结果

**2.1 客观评价结果** 能级60keV存在的放射状金属伪影最严重。随着keV的增加，椎弓根螺钉周围的金属伪影程度逐渐减弱，见图4。在每一个序列的CT图像上，选择相同层面上的四个感兴趣区域，测量AI和CNR。从图2可知，随着keV逐渐增加椎弓根螺钉周围伪影指数的平均值逐渐降低，且能级越高越趋于平稳。当虚拟单能量超过90keV后椎体前部软组织区域伪影指数显著低于常规采集图像的伪影指数，两者差异具有统计学意义(P<0.05)。当虚拟单能量从60keV增加到90keV过程中，4个感兴趣区的AI值曲线都呈现逐步减小的情况。而虚拟单能量从100keV增加到190keV过程中，4个感兴趣区的伪影指数逐渐减小且均分布数值较低的底部区域。当虚拟单能量大于110keV，4个感兴趣区域的伪影指数低于140kVp混合式能量图像。从图3可知，虚拟单能级从60keV增加到190keV过程中，螺钉左右外侧部软组织区域的CNR值逐渐增加。当虚拟单能级大于150keV，其它各感兴趣区的CNR值随着虚拟单能量数值的增加逐渐趋于平稳。当能级大于110keV，虚拟单能图像上各个感兴趣区的CNR均显著高于140kVp混合式能量图像，即CT图像所表达出来的有效信息越多，差异均具有统计学意义(P<0.05)。

**2.2 主观评价结果** 由2名高年资医师对金属植入物周围肌肉、软组织与螺钉周围位置进行评价，140kVp图像和VMI图像主观评分结果见表1。随着VMI数值的增加，虚拟单能量图像评分逐渐增高后减小。在能级110~150keV的主观评分结果高于140kVp(P<0.05，表1)，而在虚拟单能量能级>150keV时，由于组织之间的层次对比欠佳，单能量图像的主观评分逐渐减小，差异无统计学意义(P>0.05，表1)，在能级60~100keV下，VMI的主观评分均低于或等于140kVp图像的评分，且差异无统计学意义(P>0.05，表1)。表2表明两个评价者对虚拟单能图像能级60~190keV与混合能量140kVp图像的主观评分之间存在中高度一致性。其中，140keV具有Kappa值最高。

表1 对60keV~190keV和140kVp的图像质量主观评分

	60keV	70keV	80keV	90keV	100keV	110keV	120keV	130keV
评价者1	2.44±0.34	2.73±0.33	2.84±0.37	3.11±0.65	3.23±0.74	3.75±0.23*	4.22±0.23*	4.52±0.29*
评价者2	2.53±0.29	2.77±0.33	2.83±0.57	3.11±0.58	3.2±0.72	3.76±0.19*	4.23±0.16*	4.59±0.21*
	140keV	150keV	160keV	170keV	180keV	190keV	140kVp	
评价者1	4.56±0.28*	4.52±0.28*	3.15±0.78	3.14±0.54	3.2±0.65	3.15±0.31	2.89±0.87	
评价者2	4.63±0.3*	4.58±0.27*	3.1±0.6	3.11±0.29	3.25±0.31	3.12±0.22	2.86±0.73	

注：上标\*表示keV水平主观评分大于140kVp主观评分且差异具有统计学意义(P<0.05)。

表2 对60keV~190keV和140kVp的图像质量主观评价一致性

	60keV	70keV	80keV	90keV	100keV	110keV	120keV	130keV
k值	0.62	0.61	0.57	0.61	0.64	0.62	0.62	0.67
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	140keV	150keV	160keV	170keV	180keV	190keV	140kVp	
k值	0.76	0.60	0.64	0.62	0.56	0.60	0.62	
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	

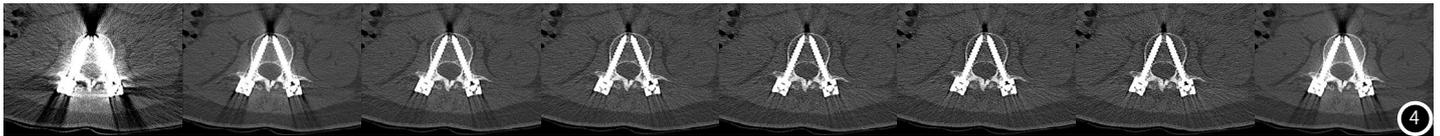


图4 金属伪影最严重层面的椎根图像(能级分布60keV-190keV和140kVp图像)

### 3 讨论

腰椎退行性病变、腰椎滑脱和腰椎畸形需要腰椎椎弓根螺钉内固定加以矫正。为了明确金属螺钉植入部位是否合适以及植入螺钉是否压迫椎管及椎间孔神经，术后需要采用影像学检查评估<sup>[7-9]</sup>。CT影像检查是常规影像学评价方法，但是由于高密度螺钉对X线束衰减比较大容易在CT图像产生不同程度的伪影等，这使得螺钉植入情况及周围组织结构难以观察，导致CT图像质量下降，而双源CT为消除金属伪影提供了有效的平台。当X线管两端的管电压不同时，能量的快速切换可以获取两种不同的影像数据。经过图像后处理可以获得不同的基物质图像和虚拟单能量图像(60keV~190keV图像)。不同能级的虚拟单能量图像在消除金属伪影和提高组织对比方面具有不同的侧重点<sup>[10-11]</sup>。因此，本研究采用双源CT虚拟单能量成像技术，探究不同虚拟单能量对金属伪影的抑制效果和去除腰椎螺钉金属伪影最佳单能量，为临床医师提供有关病情更全面的信息和全新的选择。

在先前的研究中，利用虚拟单能量技术可以有效消除金属伪影的影响，但是在寻找最佳能级的研究中，存在着争议<sup>[12-13]</sup>。祁海润等<sup>[14]</sup>的研究表明，对于椎弓根螺钉植入后的CT图像重建，采用120keV单能量图像能够最大程度地消除金属伪影，并获得最佳的图像质量，这是一种理想的能量水平。刘勇玲等<sup>[15]</sup>的研究表明，在腰椎椎弓根螺钉内固定术后，采用双源CT虚拟单能量成像技术能够显著去除腰椎金属伪影，而以130keV单能量去除金属伪影的效果最佳。在本研究中，将双源CT采集影像数据分成140kVp混合式能量图像与单能量图像两组，并对其行主观评价和客观分析。结果显示，单能量图像110~150keV的主观评分较140kVp高，单能量图像110~150keV的伪影指数较140kVp低( $P<0.05$ )，提示能级110~150keV可有效去除腰椎金属内固定产生的金属伪影。但是，能级分布在110~150keV时腰大肌对比度噪声比比较140kVp低( $P<0.05$ )，提示110~150keV降低CT图像对比度。因此，在去除CT图像金属伪影的同时，也应该考虑CT图像的对比度。尽管低强度X线重建能提高软组织密度分辨率并有利于病灶检出，但对金属伪影抑制效果较差且图像分辨率下降。其可能原因是由于管电压较低，X线的穿透能力较弱，大部分的X线能量被组织吸收导致探测器采集的数据量少，噪声大，降低图像质量。虽然高强度X线(150keV~190keV)，噪声低，图像层次丰富。但是组织的对比度降低，软组织的层次对比欠佳，不利于显示螺钉位置与周围组织毗邻关系的显示。而中等强度的X线既消除低能级图像上X线束的硬化伪影，也提高了病变检测能力和组织间的层次对比。这一结果与Do TD等<sup>[16]</sup>研究结果一致。

在对CT图像进行主观和客观分析时，本研究还将不同能量重建图像进行对比，选择金属伪影最重层面腰大肌CT值与无伪影层面腰大肌CT值进行对比。重建能级110~150keV上腰大肌CT值与正常腰大肌CT值相似，且二者差异无统计学意义( $P>0.05$ )。这说明重建能级为110~150keV能有效消除CT图像上的金属伪影，且不会在CT图像上引入新的伪影，间接说明了能级为110~150keV

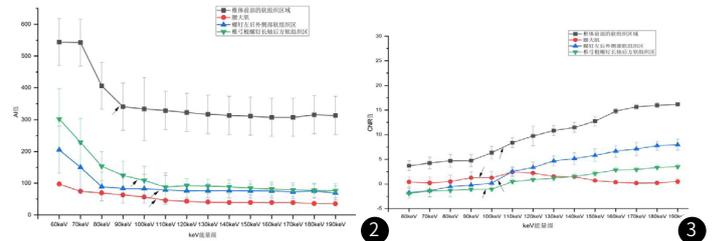


图2 不同能级下椎弓根螺钉周围的伪影指数。

注：箭头所指的是140kVp图像上相同区域的AI值。

图3 不同能级下椎弓根螺钉周围的对比度噪声比。

注：箭头所指的是140kVp图像上相同区域的CNR值。

能显著抑制金属伪影。这可能原因是重建能级为110~150keV时保持了X线穿透力，减少组织对X线能量的吸收，抑制X线硬化效应以及提高软组织层次对比，故去除金属伪影后CT影像上的腰大肌CT值与正常值无明显差异。

综上所述，在腰椎椎弓根螺钉内固定术后，采用双源CT虚拟单能量成像技术能够显著消除腰椎金属伪影，110~150keV是腰椎金属伪影抑制效果的最佳能级。

### 参考文献

- [1] Tang Y, Ye J, Hu X, et al. Retroperitoneoscopic debridement and internal fixation for the treatment of lumbar tuberculosis[J]. *Medicine* (Baltimore), 2021, 100(37): 1-7.
- [2] Tong J, Kong Q. Letter to the editor on "Single-stage posterior resection of the transversal process combined with an intervertebral foraminal approach for debridement, interbody fusion, internal fixation for the treatment of lumbar tuberculosis and psoas major abscess"[J]. *Int Orthop*, 2022, 46(6): 1431-1432.
- [3] Du X, Ou Y, Luo W, et al. Evaluation of the efficacy of OLIF combined posterior internal fixation for single-segment lumbar tuberculosis: a single-center retrospective cohort study[J]. *BMC Surg*, 2022, 22(1): 54-61.
- [4] Tang H, Lin YB, Jiang SD, et al. A new dental CBCT metal artifact reduction method based on a dual-domain processing framework[J]. *Phys Med Biol*, 2023, 68(17): 1-17.
- [5] Mu S, Wang J, Gong S. Mechanical analysis of posterior pedicle screw system placement and internal fixation in the treatment of lumbar fractures[J]. *Comput Math Methods Med*, 2022, 22: 1-10.
- [6] 陈宗柱, 陆思璇, 管海辰, 等. IMAR技术在去除腰椎内固定金属伪影中的应用价值[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(11): 167-169.
- [7] 郭旭朝, 孟钊, 王晨, 等. 基于CT影像的儿童先天性脊柱侧凸胸椎弓根螺钉置钉精确性评价[J]. *脊柱外科杂志*, 2022, 20(5): 307-312.
- [8] 韩松, 李红卫, 李宇卫, 俞鹏飞. O形臂导航辅助经皮椎弓根螺钉内固定术结合术前两步复位法治疗胸腰椎骨折[J]. *脊柱外科杂志*, 2023, 21(1): 1-6.
- [9] Sarter M, Brodhun L, Krieglstein CF, et al. Influence of the inclination angle of the S1 pedicle on screw malposition and operative revision in percutaneous iliosacral screw fixation of posterior pelvic ring fractures[J]. *Injury*, 2022, 53(10): 3384-3389.
- [10] 罗春材, 李涛, 杨立. 双层探测器双源CT的特点及临床应用[J]. *中国医疗设备*, 2021, 36(7): 170-173.
- [11] 王欣, 陈刘成, 沈龙山, 等. CT能谱成像基本原理及其临床应用进展[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2021, 19(2): 197-200.
- [12] Faulkner JE, Broeckx BJG, Martens A, et al. Single energy metal artifact reduction performs better than virtual monoenergetic dual-energy reconstruction in CT of the equine proximal phalanx[J]. *Vet Radiol Ultrasound*, 2023, 64(4): 677-685.
- [13] Kanani A, Yazdi M, Owranji AM, et al. Metal artifact reduction in cervix brachytherapy with titanium applicators using dual-energy CT through virtual monoenergetic images and an iterative algorithm: a phantom study[J]. *Brachytherapy*, 2022, 21(6): 933-942.
- [14] 魏娟, 李培岭, 赵振江, 等. 去金属伪影序列在腰椎金属植入术后磁共振成像中的应用[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 20(12): 156-158.
- [15] 刘勇玲, 范红燕, 卢强, 等. 双源CT双能量成像在去骨关节金属内固定物伪影中的应用价值[J]. *内蒙古医学杂志*, 2019, 51(04): 33-35+136.
- [16] Do TD, Heim J, Melzig C, et al. Virtual monochromatic spectral imaging versus linearly blended dual-energy and single-energy imaging during CT-guided biopsy needle positioning: Optimization of keV settings and impact on image quality[J]. *PLoS One*, 2020, 15(2): 1-17.

(收稿日期: 2023-09-21)

(校对编辑: 孙晓晴)