

论 著

双源CT Sn 100kVp能谱纯化技术在对低剂量肺结节筛查中效能分析*

赵万家¹ 郭浩东² 潘闻阳³
朱建国^{2,*}

1.高邮市中医院影像科(江苏扬州 225600)

2.南京医科大学第二附属医院影像科
(江苏南京 210011)3.西门子医疗系统有限公司CT事业部
(上海 200126)

【摘要】目的 评估双源CT Sn 100kVp能谱纯化用于低剂量肺结节筛查的诊断效能。**方法** 纳入2020年4月至2023年12月期间在南京医科大学二附院接受至少两次低剂量CT检查的100名肺结节患者,将初检患者纳入常规电压组[(以110 kVp、52 mAs行常规电压低剂量螺旋CT(LDCT)扫描)],复检患者纳入低电压组(以Sn 100kVp、70 mAs行低电压能谱纯化低剂量双源CT扫描),比较两组辐射剂量、客观图像质量评价、主观图像质量评分及诊断效能。**结果** 低电压组的容积CT剂量指数(CTDIvol)、剂量长度乘积(DLP)和有效辐射剂量(ED)均显著低于常规电压组($P < 0.05$)。低电压组肺窗标准差(SD)低于常规电压组,肺窗对比噪声比(CNR)高于常规电压组($P < 0.05$)。低电压组肺窗、纵隔窗主观图像质量评分低于常规电压组($P < 0.05$)。与病理结果相比,常规电压LDCT检测肺结节的Kappa指数为0.944,双源CT Sn 100kVp检测肺结节的Kappa指数为0.917,均与病理结果一致性良好。**结论** 本研究表明,双源CT Sn 100kVp能谱纯化技术在低剂量肺结节筛查中展现出良好的诊断效能,同时显著降低了辐射剂量,为临床提供了一种更为安全有效的筛查方法。

【关键词】 低剂量CT; 双源CT; 低电压; 能谱纯化; 高危人群筛查; 肺结节

【中图分类号】 R563

【文献标识码】 A

【基金项目】 江苏省卫生健康委
科研项目(LGY2018072)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.01.017

The Efficacy Analysis of Dual-source CT with Sn100kVp Spectral Purification Technology for Low-dose Pulmonary Nodule Screening*

ZHAO Wan-jia¹, GUO Hao-dong², PAN Wen-yang³, ZHU Jian-guo^{2,*}.

1.Department of Medical Imaging, Gaoyou Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yangzhou 225600, Jiangsu Province, China

2.Department of Medical Imaging, the Second Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210011, Jiangsu Province, China

3.CT Division, Siemens Medical Systems Limited Company, Shanghai 200126, China

ABSTRACT

Objective To evaluate the diagnostic performance of dual-source CT with Sn100kVp selected photon shield technology (SPS) for low-dose pulmonary nodule screening. **Methods** We selected 100 patients with pulmonary nodules who underwent at least twice low-dose CT examination at our hospital from April 2020 to December 2023. Those in the initial examination group were categorized under the conventional voltage group, receiving a low-dose spiral CT (LDCT) scan at 110 kVp, 52 mAs. The reexamination group was assigned to the low-voltage group, undergoing a low-dose dual-source CT scan with SPS at 100 kVp, 70 mAs. The two groups were compared on radiation dose, objective image quality score, subjective image quality score and screening efficacy. **Results** The low-voltage group exhibited lower volume CT dose index (CTDIvol), dose-length product (DLP), and effective dose (ED) compared to the conventional voltage group (all $P < 0.05$). The standard deviation (SD) of the lung window in the low-voltage group was reduced, while the contrast-to-noise ratio (CNR) was enhanced compared to the conventional voltage group ($P < 0.05$). However, the subjective image quality scores for both the lung and mediastinal windows were lower in the low-voltage group ($P < 0.05$). The Kappa values for detecting pulmonary nodules were 0.944 for conventional voltage LDCT and 0.917 for dual-source CT at Sn 100kVp, demonstrating substantial agreement with pathological findings. **Conclusion** This study demonstrates that dual-source CT with Sn100kVp SPS technology exhibits good diagnostic efficacy in low-dose lung nodule screening, while significantly reducing radiation dose, providing a safer and more effective screening method for clinical use.

Keywords: Low-dose CT; Dual-source CT; Low voltage; Selected photon shield technology; Screening of high-risk group; lung nodule

肺结节是指在肺部影像学检查中发现的一个或多个直径小于3cm的圆形、类圆形病灶,可能是肿瘤、感染、结缔组织病变、血管病变、肺炎等多种疾病的表现^[1]。临床上,肺结节往往作为肺癌的可疑早期病变,但肺癌在早期阶段没有明显症状,导致很多患者在确诊时已经处于晚期,治疗难度大、预后差,因此推荐对高风险人群定期进行肺癌筛查,以提高早期诊断率。低剂量螺旋CT(Low dose CT, LDCT)被公认为是目前唯一能够降低高危人群肺癌死亡率的影像学检查方法^[2]。在相同体积CT剂量设置下,低管电压(100 kVp)比常规120 kVp可显著降低器官剂量^[3]。但低管电压会加大图像噪声,图像质量无法保证诊断要求。近年来,随着医疗影像技术的不断创新和进步,临床发现双源CT可以在等效剂量水平下较常规CT获得更高的诊断性能和图像质量,其中能谱纯化技术发挥了重要作用,该技术利用双源CT设备的高能量和低能量数据,结合噪声模拟和重建算法,可以提高影像的对比度和清晰度^[4]。目前,双源CT能谱纯化技术已经在多种肿瘤诊断中获得良好应用效果^[5],但其在肺癌高危人群筛查中的应用还处于探索阶段。因此,本研究主要探究双源CT锡(Sn)滤过器100 kVp能谱纯化技术在低剂量肺结节筛查中的应用效果,期望为肺癌早期发现提供更准确的影像诊断方法。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选择2020年4月至2023年12月期间南京医科大学二附院进行低剂量螺旋CT检查的肺结节患者。

纳入标准:(1)符合肺结节诊断标准^[6];(2)符合肺癌高危人群条件^[7];(3)至少2次接受螺旋CT检查,检查间隔2月以内;(4)临床、病理及影像资料完整。排除标准:(1)无病理明确诊断结果者;(2)失访;(3)碘对比剂过敏;(4)合并严重肝肾功能损害、重症甲状腺疾患等;(5)肺结节治疗史或恶性肿瘤史。最终纳入100例患者,男性58例,女性42例,年龄52~76岁,平均(61.79±7.05)岁,病灶最大径0.7~3.8 cm,平均(2.18±0.66)cm,病灶位置:上叶59例、下叶41例。经手术或肺穿刺活检,100例最终确诊良性病变22例、恶性病变78例,良性病变包括错构瘤3例、肺脓肿3例、纤维瘤1例、细菌感染5例、结核球7例、肺炎性假瘤2例,恶性病变包括腺癌49例、鳞癌21例、小细胞肺癌4例、细支气管肺泡癌4例。将初检患者纳入常规电压组,复检患者纳入低电压组。本研

【第一作者】赵万家,男,副主任医师,主要研究方向:胸、腹部影像诊断及介入治疗。E-mail: wjzhao8848@126.com

【通讯作者】朱建国,男,主任医师/副教授,主要研究方向:CT和MRI功能成像。E-mail: zhujianguo@njmu.edu.cn

究采用回顾性研究方法,经医院伦理委员会批准,所有筛查对象豁免签署知情同意书。

1.2 研究方法 使用德国西门子医疗SOMATOM Definition Flash双源CT扫描仪进行检测,患者仰卧位,手臂上举高于头部,扫描范围从肺尖到肋膈角(包括全部肺),受检前由专人训练屏气,受检时吸气末一次屏气完成扫描。初检采用常规剂量,管电压110 kVp,管电流曝光时间乘积52 mAs,采用滤波反投影重建算法重建图像;2月内复检,复检采用低剂量、能谱纯化技术,管电压Sn 100 kVp,管电流曝光时间乘积70 mAs,采用高级建模迭代重建(Advanced Modelled Iterative Reconstruction, ADMIRE),强度3级,卷积核I30。其他参数相同,准直器宽度 16×0.6 mm,螺距1.5,转速0.8 s/rot,视野 400×400 mm²,矩阵 512×512 ,扫描层厚5 mm,层间距5 mm,重建层厚1.0~1.25 mm。

1.3 图像质量评价方法 (1)辐射剂量。使用仪器自带的辐射剂量报告功能,获得容积CT剂量指数(volume CT dose index, CTDIvol)、剂量长度乘积(dose length product, DLP),计算有效辐射剂量(effective dose, ED), $ED=DLP \times K$ (转换因子 $K=0.014$)^[8]。

(2)客观图像质量评价。将原始CT图像上传至西门子Syngovia后处理工作站进行重建,生成轴位、冠状位和矢状位图像,由2位高年资影像科医师进行盲评(隐去扫描参数、患者信息),从肺结节边缘10 mm²处勾画感兴趣区,注意避开伪影,测量肺窗、纵隔窗平均CT值和标准差(standard deviation, SD),连续3次取平均值,并计算肺窗、纵隔窗图像信噪比(signal to noise ratio, SNR)、对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR),肺窗SNR=肺动脉平均CT值/肺动脉噪声水平,肺窗CNR=(肺动脉平均CT值-肺壁肌肉平均CT值)/肺动脉噪声水平,纵隔窗SNR=肺壁肌肉平均CT值/肺壁肌肉噪声水平,肺窗CNR=(肺壁肌肉平均CT值-皮下脂肪平均CT值)/皮下脂肪噪声水平^[9]。

(3)主观图像质量评分。由主治医师、主任医师评价肺窗、纵隔窗图像质量,采用4分法^[10]进行判断,1分:图像噪声过大,血管、气管束等组织结构及边界未显示清晰,不见结节,不能用于诊断;2分:图像噪声较大,血管、气管束等组织结构及边界

未完全显示清晰,可见结节但不清晰,基本能用于诊断;3分:图像噪声较小,血管、气管束等组织结构及边界清晰度尚可,结节,能用于诊断;4分:图像噪声小,血管、气管束等组织结构及边界显示清晰,可见明显结节,完全能用于诊断。

1.4 统计学分析 应用SPSS 24.0分析研究数据,当 $P < 0.05$ 时,认为具有统计学意义。计量数据使用($\bar{x} \pm s$)表述,组间用t检验;计数数据使用率表述,组间用 χ^2 检验;肺结节CT筛查结果与病理结果的一致性检验采用Kappa指数,Kappa ≥ 0.75 表示与病理结果高度一致。

2 结果

2.1 辐射剂量比较 低电压组CTDIvol、DLP、ED低于常规电压组,差异有统计学意义($P < 0.05$),见表1。

表1 两组辐射剂量比较

组别	CTDIvol(mGy)	DLP(mGy·cm)	ED(mSv)
常规电压组(n=100)	2.45±0.57	89.55±20.49	1.23±0.36
低电压组(n=100)	0.62±0.14	23.51±4.68	0.22±0.04
t	16.551	16.515	14.750
P	<0.001	<0.001	<0.001

2.2 客观图像质量评价比较 低电压组肺窗SD低于常规电压组,肺窗CNR高于常规电压组,其他客观图像质量参数差异无统计学意义($P > 0.05$),见表2、图1~3。

2.3 主观图像质量评价比较 低电压组肺窗、纵隔窗主观图像质量评分低于常规电压组,差异有统计学意义($P < 0.05$),见表3。

2.4 诊断效能比较 与病理结果相比,常规电压LDCT检测出良性病变22例、恶性病变76例,Kappa指数为0.944,与病理结果一致性良好;双源CT Sn 100kVp检测出良性病变22例、恶性病变75例,Kappa指数为0.917,与病理结果一致性良好,见表4。

表2 两组客观图像质量评价比较

组别	SD		SNR		CNR	
	肺窗	纵隔窗	肺窗	纵隔窗	肺窗	纵隔窗
常规电压组(n=100)	84.65±18.92	97.29±30.31	10.46±2.33	0.61±0.18	2.25±0.73	1.80±0.49
低电压组(n=100)	76.45±14.58	106.52±35.96	10.85±2.24	0.64±0.20	2.53±0.81	1.77±0.52
t	3.433	1.963	1.207	1.115	2.568	0.420
P	0.001	0.051	0.229	0.266	0.011	0.675

表3 两组主观图像质量评价比较(分)

组别	肺窗	纵隔窗
常规电压组(n=100)	3.31±0.25	3.17±0.31
低电压组(n=100)	3.16±0.32	3.02±0.26
t	2.054	2.026
P	0.044	0.047

表4 两组诊断效能比较(%)

组别	准确度	灵敏度	特异度	阳性预测值	阴性预测值
常规电压CT	98.00	97.44	100.00	100.00	91.67
低电压CT	97.00	96.15	100.00	100.00	88.00

男, 45岁, 经病理证实为左肺上叶腺癌。图1为常规电压检查, CTDIvol 2.85mGy, DLP 101.61mGy·cm, ED 1.49mSv, SD 102.86(肺窗)、124.95(纵隔窗), SNR 11.95(肺窗)、0.75(纵隔窗), CNR 3.12(肺窗)、2.10(纵隔窗); 图2为低电压检查, CTDIvol 0.71mGy, DLP 28.62mGy·cm, ED 0.24mSv, SD

90.65(肺窗)、120.32(纵隔窗), SNR 10.57(肺窗)、0.62(纵隔窗), CNR 3.01(肺窗)、1.95(纵隔窗); 两次肺窗、纵隔窗主观图像质量评分均为3分。图3为双能量后处理伪彩图, 左肺上叶见一枚直径约1.3cm结节, 内见空泡影, 厚壁, 边缘见毛刺征, 邻近胸膜受牵拉增厚。

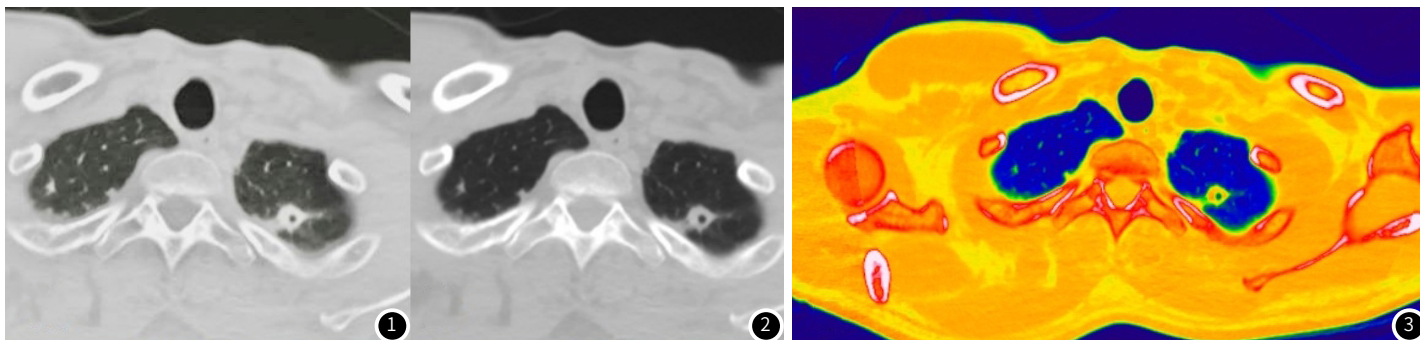


图1~3 常规电压与低电压图例对比。

3 讨论

肺癌在癌症发病率中排名第二, 在癌症死亡率中排名第一, 实施高危人群筛查措施对控制肺癌增加趋势有重要意义^[11]。LDCT是肺癌高危人群的必要筛查手段, 近年来, 早期肺癌发现率越来越高, 这都归功于LDCT的普及^[12]。然而, LDCT虽在肺癌筛查方面具有独特优势, 却不可避免地会对患者造成电离辐射损伤^[13]。临床研究表明, 通过改变CT扫描参数, 特别是降低管电压, 可以有效降低患者接受的辐射剂量, 这一方法被认为是最直接有效的降低辐射剂量的途径之一, 但这种调整需要在一定程度上平衡图像质量和辐射剂量之间的关系^[14-15]。双源CT能谱纯化技术是一种先进的医学影像技术, 通过对X射线能量进行分离和纯化, 来减少伪影和伴随组织的散射, 具有更高的分辨率和更好的软组织对比度, 对于诊断复杂疾病具有重要意义^[16]。

CTDIvol是衡量CT扫描剂量的重要指标, DLP考虑了扫描的长度, 表示患者在CT扫描中接受的总辐射剂量, 而ED考虑了不同组织和器官对辐射的敏感程度, 是一个综合性的辐射剂量指标, 也提示了减少患者在CT扫描中接受的辐射剂量对降低潜在的辐射风险具有重要意义^[17-18]。既往研究结果显示, 双源CT检查中, 较低的CTDIvol、DLP、ED值意味着患者在CT扫描中接受更少的X射线辐射, 降低患者的辐射风险^[19]。本研究结果与之相符, 如表1所示低电压组CTDIvol、DLP、ED均低于常规电压组, 提示双源CT Sn 100 kVp能谱纯化技术的应用可以有效降低辐射剂量, 为低剂量肺结节筛查提供了一种有效的方法, 具有较好的临床应用前景。

周鹏等^[20]通过降低扫描电压和电流, 成功将单次扫描的ED降低至0.2 mSv, 较过去的低剂量CT技术有了显著改进。本研究中将ED降低至0.22 mSv, 效果同样显著。这是因为高管电压下X射线能量更高, 穿透能力更强, 会产生更多的次生辐射, 而降低电压会减少X射线能量, 减少次生辐射的产生, 从而降低患者接受的辐射剂量^[21]。这进一步证实了降低扫描电压在减少患者辐射暴露方面的有效性。

SD用于衡量图像中对比度和灰度分布情况, SNR和CNR则分别用于衡量图像中目标结构的信号强度与噪声水平以及目标结构与背景的对比度, 它们对于评估图像质量具有重要意义。本研究结果显示低电压组肺窗SD低于常规电压组, 肺窗CNR高于常规电压组, 表明双源CT Sn 100kVp能谱纯化可能会导致图像灰度值分布更为集中, 图像对比度降低。何付权等^[22]研究也发现, 双源CT Sn 100kVp检测较常规电压LDCT检测SD降低, CNR升高, 与本研究结果相似。本研究还发现低电压组肺窗、纵隔窗主观图像质量评分低于常规电压组, 这可能意味着Sn 100kVp所产生的图像在人眼感知中不如常规电压清晰。这可能是由于低电压条件下, X射线的穿透能力减弱, 导致图像的细节显示不足或对比度较差。虽然双源CT Sn 100kVp能谱纯化用于低剂量肺结节筛查在一定程度上减低了主观图像质量, 但仍可以满足诊断需求。刘莎莎等^[23]报道, 低管电压(≤ 100 kVp)CT较常规电压扫描(120 kVp)图像质量评分低, 但均可以满足诊断需求, 本研究结论与之一致。

与病理结果相比, 常规电压LDCT检测肺结节Kappa指数为0.944, 双源CT Sn 100kVp检测肺结节Kappa指数为0.917, 均与病理结果一致性良好, 这一发现意味着在降低电压的同时采用双源CT能谱纯化技术可以有效减少患者暴露辐射剂量, 但不影响图像质量。因此, 影像科医师可以根据患者具体情况灵活调整扫描参数, 以实现在辐射剂量最低的情况下获得足够的图像信息, 从而最大限度地保护患者健康^[24-25]。

本研究也存在一些局限性。首先, 本研究的样本量较小, 可能影响结果的统计学显著性, 拟在未来研究中扩大样本量, 并在多中心进行, 以进一步提高研究结果的普遍性和可靠性; 其次, 本研究中图像质量的主观评分可能受到评估者经验和偏好的影响, 未来研究应引入更多客观指标, 结合多名评估者的综合评分以减少偏差; 此外, 本研究缺乏长期随访数据, 未能评估低剂量CT筛查在长期随访中的有效性和安全性, 未来研究应关注长期随访结果, 以验证低剂量CT筛查的持续有效性; 最后, 尽管双源CT

Sn 100 kVp能谱纯化技术在减少辐射剂量方面表现良好,但在某些情况下,低电压可能导致图像细节显示不足,未来研究应探索进一步优化技术的方法,以平衡辐射剂量和图像质量。

综上所述,双源CT Sn 100kVp能谱纯化用于低剂量肺结节筛查可以在保证图像质量的前提下尽量降低患者的辐射风险,这一扫描诊断模式在临床值得推广应用。

参考文献

- [1] Zhao W, Ma J, Zhao L, et al. PUNDIT: pulmonary nodule detection with image category transformation[J]. *Med Phys*, 2023, 50(5): 2914-2927.
- [2] 孔令芹, 张晓敏, 李西川, 等. 低剂量螺旋CT在肺癌筛查中的应用[J]. *中国肺癌杂志*, 2022, 25(9): 678-683.
- [3] Yoshida M, Nakaura T, Oda S, et al. Effects of tube voltage and iodine contrast medium on radiation dose of whole-body CT[J]. *Acta Radiol*, 2022, 63(4): 458-466.
- [4] Sauter AP, Shapira N, Kopp FK, et al. CTPA with a conventional CT at 100 kVp vs. a spectral-detector CT at 120 kVp: Comparison of radiation exposure, diagnostic performance and image quality[J]. *Eur J Radiol Open*, 2020, 7: 100234.
- [5] 张秀莉, 代岳, 谢丽响, 等. 双源CT能谱纯化扫描技术在多发性骨髓瘤中的应用[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2022, 28(3): 296-302.
- [6] 中华医学会呼吸病学分会肺癌学组, 中国肺癌防治联盟专家组. 肺结节诊治中国专家共识(2018年版)[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2018, 41(10): 763-771.
- [7] 中国肺癌防治联盟, 中华医学会呼吸病学分会肺癌学组, 中国医师协会呼吸医师分会肺癌工作委员会. 肺癌筛查与管理中国专家共识[J]. *国际呼吸杂志*, 2019, 39(21): 1604-1615.
- [8] Cohen SL, Wang JJ, Chan N, et al. Lung cancer screening CT: sex-specific conversion factors to estimate effective radiation dose from dose-length product[J]. *Chest*, 2019, 156(6): 1214-1222.
- [9] 曹治婷, 刘铁军, 廖立, 等. 高级迭代重建在双低肺动脉CT成像的应用价值[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2019, 25(2): 192-196.
- [10] 彭盛坤, 赵原, 蒲红. 不同成像参数与肺部结节CT图像质量及辐射剂量的相关性研究[J]. *中国循证医学杂志*, 2019, 19(10): 1158-1162.
- [11] Huang J, Deng Y, Tin MS, et al. Distribution, risk factors, and temporal trends for lung cancer incidence and mortality: a global analysis[J]. *Chest*, 2022, 161(4): 1101-1111.
- [12] 阿里甫·依马木, 文智, 周永, 等. 高危人群低剂量CT与肿瘤标志物联合检查早期肺癌的效能研究[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(2): 58-60.
- [13] 田杜雪, 宋兰, 隋昕, 等. 深度学习重建在低辐射剂量CT肺动脉成像中的临床应用价值[J]. *中华放射学杂志*, 2022, 56(5): 563-568.
- [14] 刘丹丹, 崔莹, 赵波, 等. 定位像扫描参数对胸部CT影像质量和辐射剂量影响的模体研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2021, 41(3): 217-221.
- [15] 石海兵, 周卫丽. 双源CT Flash低剂量模式在CT引导下经皮肺穿刺活检中的应用[J]. *罕少疾病杂志*, 2021, 28(3): 60-61.
- [16] 姜一, 田葵, 沙晋璐, 等. 基于能谱纯化结合迭代重建算法在继发性肺结核患者低剂量CT检查中的应用[J]. *CT理论与应用研究*, 2022, 31(1): 95-101.
- [17] Guo LW, Chen Q, Shen YC, et al. Evaluation of a low-dose computed tomography lung cancer screening program in Henan, China[J]. *JAMA Netw Open*, 2020, 3(11): e2019039.
- [18] Gierada DS, Black WC, Chiles C, et al. Low-dose CT screening for lung cancer: evidence from 2 decades of study[J]. *Radiol Imaging Cancer*, 2020, 2(2): e190058.
- [19] 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.
- [20] 青浩渺, 刘杰克, 何长久, 等. 低剂量螺旋CT肺癌筛查与肺结节精准诊断研究[J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(10): 1147-1148.
- [21] Vivier S, Deken V, Arous Y, et al. Pediatric chest computed tomography at 100 kVp with tin filtration: comparison of image quality with 70-kVp imaging at comparable radiation dose[J]. *Pediatr Radiol*, 2020, 50(2): 188-198.
- [22] 何付权, 李亚飞, 罗倩, 等. 双源CT Sn100 kV能谱纯化技术在胸部CT筛查中的应用[J]. *实用放射学杂志*, 2021, 37(5): 846-849, 856.
- [23] 刘莎莎, 于双得, 贾海鹏, 等. 三代双源CT Sn 100 kVp能谱纯化成像用于引导经皮穿刺肺活检[J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40(4): 609-613.
- [24] 孔海涛, 郭子祺, 刘婷婷. 人工智能技术结合低剂量方案在胸部CT成像中的应用研究探讨[J]. *罕少疾病杂志*, 2024, 31(12): 75-76, 102.
- [25] 周宇元. 多层螺旋CT多平面重建技术对pGGN样肺腺癌的诊断效能[J]. *罕少疾病杂志*, 2025, 32(12): 39-42.

(收稿日期: 2024-08-12)

(校对编辑: 赵望淇)