

Application of Low-dose CT in Screening Small Pulmonary Nodules and Evaluation of Radiation Dose*

论 著

TANG Zhao-hua, YANG Xi-wei, KONG Ling-nan, GAO Yuan*

Department of Radiology, Zhangjiagang Fifth People's Hospital, Zhangjiagang 215621, Jiangsu Province, China

低剂量CT在肺小结节筛查中的应用及辐射剂量评价*

唐兆华 杨喜威 孔令楠

高原*

张家港市第五人民医院放射科

(江苏 张家港 215621)

【摘要】目的 探讨低剂量CT在肺小结节筛查中的应用价值,系统评价其辐射剂量。**方法** 选取2024年1月至2025年10月在本院进行肺小结节筛查的103例受检者作为研究对象,所有受检者均接受低剂量CT和常规剂量CT扫描检查。比较两种扫描方式对肺小结节的检出率及图像质量;分析两种扫描方式的辐射剂量相关参数,包括CT容积剂量指数(CTDIvol)、剂量长度乘积(DLP)及有效剂量(ED);以病理结果为金标准,评价两种扫描方式对肺小结节良恶性鉴别的诊断性能。**结果** 103例受检者中,低剂量CT共检出肺小结节58枚,检出率为56.31%;常规剂量CT共检出肺小结节60枚,检出率为58.25%,两种方法肺小结节检出率、实性结节、磨玻璃结节、混合磨玻璃结节的检出率及图像质量等级比较差异均无统计学意义($P>0.05$)。低剂量CT扫描的CTDIvol、DLP及ED均显著低于常规剂量CT,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。以病理结果为金标准,103例受检者中,确诊恶性结节23例,良性结节35例,其余45例未检出结节。低剂量CT鉴别肺小结节良恶性的敏感度、特异度、准确度均差于常规剂量CT,其中常规剂量CT准确度明显高于低剂量CT,差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论** 低剂量CT在肺小结节筛查中具有与常规剂量CT相当的检出率、形态学特征识别能力,图像质量可满足临床诊断需求,且辐射剂量更低,但良恶性诊断性能差于常规剂量CT。

【关键词】 低剂量CT;肺小结节;筛查;辐射剂量;诊断性能

【中图分类号】 R563

【文献标识码】 A

【基金项目】 江苏省中医药学会

科研项目(ZXFZ2024092)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.014

ABSTRACT

Objective To explore the application value of low-dose CT in the screening of small pulmonary nodules and systematically evaluate its radiation dose. **Methods** 103 subjects who underwent small pulmonary nodule screening in the hospital from January 2024 to October 2025 were selected as research subjects. All subjects received low-dose CT scan and conventional-dose CT scan. The detection rate and image quality of small pulmonary nodules between the two scanning methods were compared, and the radiation dose-related parameters of the two scanning methods were analyzed, including CT volume dose index, dose length product and effective dose. The pathological result was taken as the gold standard to evaluate the diagnostic efficiency of the two scanning methods on identifying benign and malignant small pulmonary nodules. **Results** Among 103 subjects, low-dose CT detected a total of 58 small pulmonary nodules, with a detection rate of 56.31%. Conventional-dose CT detected 60 small pulmonary nodules, yielding a detection rate of 58.25%. No statistically significant differences were observed between the two methods in detection rates of small pulmonary nodules, solid nodules, ground-glass nodules, mixed ground-glass nodules and image quality grading ($P>0.05$). The CTDIvol, DLP and ED of low-dose CT scan were significantly lower than those of conventional-dose CT (all $P<0.05$). Taking pathological result as the gold standard, 23 malignant nodules and 35 benign nodules were confirmed among the 103 subjects, while no nodules were detected in the remaining 45 cases. The sensitivity, specificity and accuracy of low-dose CT in distinguishing benign from malignant small pulmonary nodules were inferior to those of conventional-dose CT. Notably, conventional-dose CT demonstrated significantly higher accuracy than low-dose CT ($P<0.05$). **Conclusion** Low-dose CT has the same detection rate and morphological feature recognition ability as conventional-dose CT in screening small pulmonary nodules. The image quality can meet the needs of clinical diagnosis, and the radiation dose is significantly reduced. However, the diagnostic performance of low-dose CT for benign and malignant nodules is worse than that of conventional-dose CT.

Keywords: Low-dose CT; Small Pulmonary Nodules; Screening; Radiation Dose; Diagnostic Performance

肺癌作为当前极为高发的恶性肿瘤类型,严重威胁人类健康。大量临床研究与实践表明,早期筛查与及时干预是改善肺癌患者预后、提高生存率的关键^[1]。肺小结节作为早期肺癌的重要影像学表现,实现对其的精准筛查,对于肺癌的早诊早治具有重要意义^[2]。在肺癌筛查的影像学方法中,常规剂量CT凭借其高分辨率的优势,能够清晰显示肺部细微结构,对肺小结节的检测具有较高的敏感度与特异度。然而,常规剂量CT所产生的辐射剂量相对较高,该弊端使其难以适用于大规模人群的普遍性筛查,尤其是对于儿童、老年人群等特殊年龄群体,高辐射剂量可能带来潜在的健康风险,因而不适用于此类人群的定期筛查^[3]。低剂量CT技术通过对扫描参数进行优化调整,有效降低辐射剂量的同时,仍能保留足以用于疾病诊断的关键信息,因此逐渐在肺小结节筛查领域得到应用^[4]。但针对涵盖广泛年龄跨度人群的低剂量CT应用效果及辐射安全性研究目前仍较为匮乏。基于此,本研究选取103例受检者作为研究对象,开展低剂量CT与常规剂量CT的对比研究,旨在深入探讨低剂量CT在广泛年龄人群肺小结节筛查中的应用价值,从而为临床筛查策略的优化提供科学、可靠的依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2024年1月至2025年11月在本院进行肺小结节筛查的103例受检者作为研究对象,其中男性57例,女性46例;年龄5~85岁,平均(48.62±15.35)岁;体质指数(BMI)(21.89±3.42)kg/m²。其中儿童及青少年(5~18岁)12例,成年(19~64岁)68例,老年(≥65岁)23例。

纳入标准: 明确为肺小结节,经过支气管镜或穿刺病理活检明确结节性质^[5];均接受低剂量CT和常规剂量CT扫描,扫描间隔时间≤1周;自愿参与本研究并签署知情同意书(儿童及青少年由法定监护人签署)。排除标准:存在肺部疾病相关临床症状或因咳嗽、胸闷、咯血等症状;就诊合并肺不张、活动性肺炎、胸腔积液等影响结节观察的肺

【第一作者】唐兆华,男,主治医师,主要研究方向:医学影像诊断。E-mail: 15062501875@163.com

【通讯作者】高原,男,副主任医师,主要研究方向:医学影像诊断。E-mail: 492979832@qq.com

部疾病；伴有心、肝、肾等重要脏器功能不全；有肺部手术史、放化疗史或胸部外伤史；存在意识障碍、精神疾病或无法配合屏气扫描。

1.2 检查方法 采用东软64排螺旋CT机(型号: Neu Viz Prime)进行胸部扫描,所有受检者均去除胸部金属物品,确保扫描过程中屏气稳定,减少运动伪影。扫描范围自肺尖上方2cm至肺底下方2cm,覆盖整个肺部区域。扫描参数设置:①低剂量CT:管电压根据年龄及体重调整(5~18岁:80~100kV;19~64岁:100~120kV;≥65岁:100kV),管电流采用自动毫安秒技术(儿童及青少年:15~25mA;成年及老年:25~40mA),扫描时间0.5s/圈,层厚5mm,层距5mm,重建间隔1mm,矩阵512×512,视野(FOV)根据体型调整(儿童:250~300mm×250~300mm;成人:350mm×350mm)。②常规剂量CT:管电压120kV(儿童及青少年调整为100kV),管电流(儿童及青少年:80~100mA;成年及老年组:120~150mA),其他扫描及重建参数与低剂量CT扫描一致。两组均采用标准算法进行图像重建。

图像阅片:借助双盲法,由两位达到副主任医师及以上职称水平的影像科医师执行对低剂量CT和常规剂量CT图像进行独立阅片,若两位医师阅片结果不一致,由第3名资深医师(10年以上胸部影像诊断经验)仲裁达成共识。另由1名副主任医师采用盲法对两组图像质量进行独立评价。

1.3 观察指标

1.3.1 结节检出情况 记录两组扫描方式检出的肺小结节数量,计算检出率;按结节密度分为实性结节(密度均匀,遮挡肺纹理)、磨玻璃结节(密度轻度增高,不遮挡肺纹理)、混合磨玻璃结节(磨玻璃密度基础上含实性成分),统计各类结节构成比。

1.3.2 辐射剂量参数 从CT设备工作站提取CT容积剂量指数(CTDIvol)、

剂量长度乘积(DLP)及有效剂量(ED),按公式 $ED=DLP \times k$ 计算[k为胸部组织权重因子,取 $0.014mSv/(mGy \cdot cm)$]^[6]。

1.3.3 良恶性鉴别诊断性能 以病理结果为金标准,计算敏感度、特异度、准确度。

1.3.4 图像质量评价 采用1~5级评分法^[7]。1分(差):图像模糊,伪影严重,无法识别肺部结构及结节;2分(中差):图像欠清晰,伪影明显,难以准确判断结节特征;3分(中等):图像基本清晰,伪影较轻,可识别结节大致特征;4分(良好):图像清晰,伪影轻微,能准确显示结节特征;5分(优秀):图像清晰无伪影,可清晰显示结节细微结构。3~5分为满足临床诊断需求,1~2分为不满足。

1.4 统计学分析 本研究运用SPSS Statistics 26.0高级分析模块进行数据处理。连续性变量经Shapiro-Wilk正态性检验,以均值±标准差($\bar{x} \pm s$)形式报告,组间比较采用独立样本t检验,分类变量以频数(构成比)[n(%)]表示,应用Pearson χ^2 检验或Fisher精确概率法进行组间差异分析,等级变量采用Mann-Whitney U非参数检验。所有假设检验均为双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

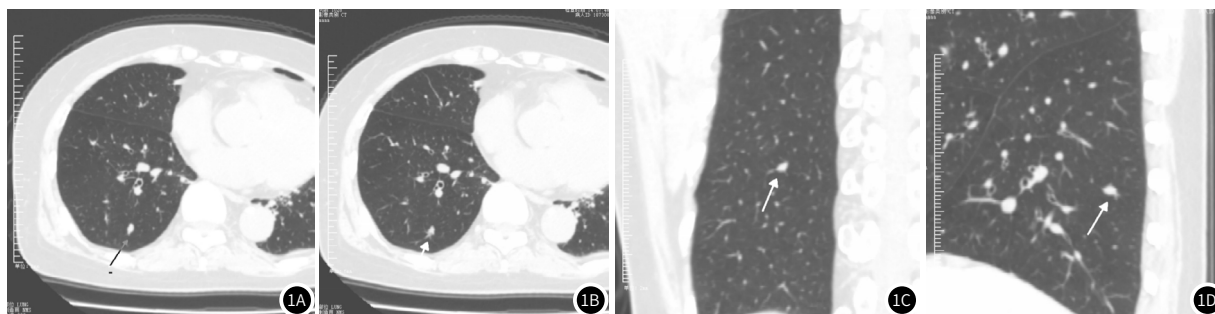
2 结果

2.1 不同剂量CT扫描肺小结节检出情况比较 103例受检者中,低剂量CT共检出肺小结节58枚,检出率为56.31%;常规剂量CT共检出肺小结节60枚,检出率为58.25%,两种方法检出率、实性结节、磨玻璃结节、混合磨玻璃结节的检出率比较差异无统计学意义($P>0.05$)。见表1。同一病人常规剂量CT和低剂量CT扫描肺小结节的MPR重建图见图1~2。

2.2 不同剂量CT扫描肺小结节的辐射剂量参数比较 低剂量CT扫描的CTDIvol、DLP及ED均显著低于常规剂量CT,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),见表2。

表1 不同剂量CT扫描肺小结节检出情况比较[例(%)]

| 方法 | 受检者例数 | 肺小结节检出率 | 实性结节检出率 | 磨玻璃结节检出率 | 混合磨玻璃结节检出率 |
|------------|-------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 低剂量CT | 103 | 58(56.31) | 20(34.48) | 17(29.31) | 21(36.21) |
| 常规剂量CT | 103 | 60(58.25) | 23(38.33) | 20(33.33) | 17(28.33) |
| χ^2 值 | - | 0.079 | 0.265 | 0.296 | 0.516 |
| P值 | - | 0.778 | 0.607 | 0.586 | 0.472 |



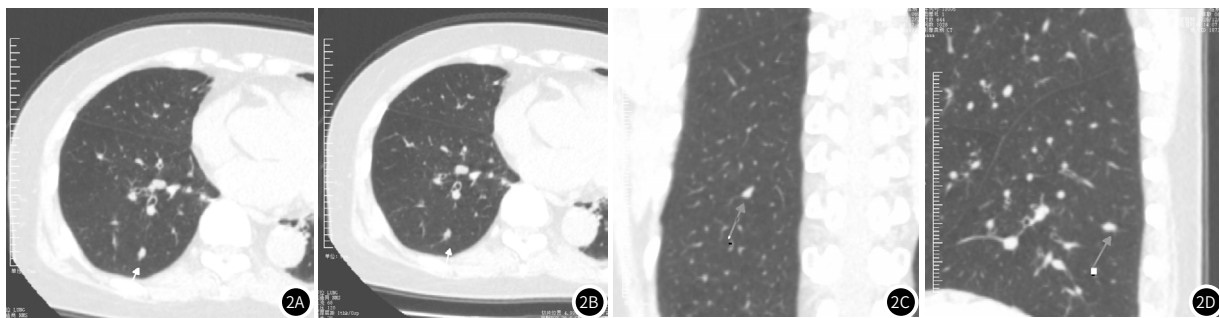


图1 常规剂量CT扫描。图2 低剂量CT扫描。

表2 不同剂量CT扫描肺小结节的辐射剂量参数比较

| 方法 | 受检者例数 | CTDIvol(mGy) | DLP(mGy·cm) | ED(mSv) |
|---------|-------|--------------|--------------|-----------|
| 低剂量CT组 | 103 | 1.22±0.28 | 137.56±7.92 | 0.83±0.11 |
| 常规剂量CT组 | 103 | 5.57±1.18 | 265.38±30.45 | 3.71±1.02 |
| t值 | - | 36.402 | 41.230 | 28.067 |
| P值 | - | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

2.3 不同剂量CT扫描肺小结节良恶性诊断性能比较 以病理结果为金标准，103例受检者中，确诊恶性结节23例，良性结节35例，其余45例未检出结节。低剂量CT鉴别肺小结节良恶性的敏感度、特异度、准确度均差于常规剂量CT，其中常规剂量CT准确度明显高于低剂量CT，差异有统计学意义($P<0.05$)。见表3。

2.4 不同剂量CT扫描肺小结节的图像质量比较 低剂量CT与常规剂量CT扫描肺小结节图像质量等级比较差异无统计学意义($P>0.05$)，见表4。

表4 不同剂量CT扫描肺小结节的图像质量比较[例(%)]

| 方法 | 受检者例数 | 优 | 良 | 中 | 差 |
|---------|-------|-----------|-----------|---------|---------|
| 低剂量CT组 | 103 | 83(80.58) | 16(15.53) | 4(3.88) | 0(0.00) |
| 常规剂量CT组 | 103 | 86(83.50) | 14(13.59) | 3(2.91) | 0(0.00) |
| Uc值 | - | 0.554 | | | |
| P值 | - | 0.580 | | | |

表3 不同剂量CT扫描肺小结节良恶性诊断性能比较(n, %)

| 方法 | 病理诊断结果 | 阳性 | 阴性 | 敏感度(%) | 特异度(%) | 准确度(%) |
|------------|----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 低剂量CT | 恶性(n=23) | 17(73.91) | 6(26.09) | 73.91(17/23) | 82.86(29/35) | 79.31(46/58) |
| | 良性(n=35) | 6(17.14) | 29(82.86) | | | |
| 常规剂量CT | 恶性(n=23) | 21(91.30) | 2(8.70) | 91.30(21/23) | 94.29(33/35) | 93.10(54/58) |
| | 良性(n=35) | 2(5.71) | 33(94.29) | | | |
| χ^2 值 | - | - | - | 2.421 | 2.258 | 4.640 |
| P值 | - | - | - | 0.243 | 0.133 | 0.031 |

3 讨论

肺小结节良恶性精准鉴别是早期肺癌防治的关键，恶性结节若未及时干预，会显著升高病情进展风险、降低患者生存率^[8]。当前肺小结节检查以影像学手段为主，传统胸部X线片因对比度

低、组织重叠干扰大，结节检出敏感性、特异性低且漏诊率高，已难以满足临床精准筛查需求^[9]。CT凭借薄层扫描的高密度分辨率，能清晰显示结节特征，是目前肺小结节诊断鉴别首选，但存

在电离辐射风险, 辐射防护与诊断效能的平衡成为临床重点关注方向^[10]。低剂量CT通过优化管电流等参数减辐射, 依托肺组织高对比度的解剖优势, 符合辐射防护最优化原则^[11]。

本研究结果显示, 低剂量CT与常规剂量CT在肺小结节总检出率(56.31%vs58.25%)、各亚型(实性、磨玻璃、混合磨玻璃)检出率及图像质量等级上均无统计学差异。这一结果与Ding等^[12]研究中低剂量CT与常规剂量CT在肺结节检出率上无显著差异, 图像质量评分相近, 且两者的一致性良好的结论一致。从解剖基础来看, 肺组织以含气结构为主, 与结节病灶存在天然高对比度, X线吸收率低, 此种生理优势降低对高辐射剂量的依赖, 即使减少辐射输出, 仍能清晰区分结节与周围正常肺组织, 为低剂量CT的检出效能提供基础。从技术与设备层面, 低剂量CT并非单纯降低剂量, 而是通过优化扫描参数减少噪声干扰, 扫描参数已做针对性优化, 确保实性、磨玻璃等各类结节均能被有效识别, 最终实现与常规剂量CT相当的检出效果及图像质量。辐射剂量控制是临床影像学检查的核心关注方向之一^[13-14]。本研究中, 低剂量CT的CTDIvol、DLP及ED均显著低于常规剂量CT, 低剂量CT通过降低管电流减少X线输出强度, 管电流直接决定单位时间内的X线光子数量, 是影响辐射剂量的关键因素, 管电流降低后, 单位容积组织接受的辐射剂量随之直接下降。同时, 低剂量CT在保证扫描范围覆盖全肺的前提下, 未改变扫描长度, 但若需进一步控量, 还会通过精准匹配扫描范围与受检者胸廓大小, 避免无效扫描区域, 间接降低DLP。而ED由DLP与胸部组织权重因子(k值)计算得出, 因此DLP的降低会直接导致ED成比例显著下降^[15]。

良恶性的精准区分是选择观察随访、手术切除还是进一步检查的前提, 明确两种CT的诊断效能, 才能为临床选择合适的扫描方式提供依据。若诊断性能不佳, 恶性结节漏诊会延误早期干预时机, 导致病情进展为中晚期肺癌, 显著降低患者生存率; 良性结节误诊则可能引发过度治疗, 增加患者手术创伤、经济负担与心理压力, 同时造成医疗资源的浪费, 违背临床诊疗的优化原则^[16-17]。本研究结果显示低剂量CT与常规剂量CT均具备一定诊断效能, 但常规剂量CT的敏感度(91.30%)、特异度(94.29%)及准确度(93.10%)均优于低剂量CT, 其中准确度差异具有统计学意义。这一结果与Yao等^[18]研究中常规剂量CT诊断性能优于低剂量CT的结论相符, 其核心原因在于常规剂量CT的辐射剂量更高, 图像信噪比及空间分辨率更优, 能够更清晰显示肺小结节的细微形态学特征, 低剂量CT虽能满足结节检出的基本需求, 但低剂量条件下图像噪声略有增加, 对微小恶性征象的显示能力受到一定限制, 导致部分恶性结节误诊或漏诊。因此, 在临床实践中可形成低辐射筛查-精准诊断的阶梯式路径, 低剂量CT作为肺小结节初筛手段, 广泛适用于大规模人群普查及高危人群随访; 常规剂量CT则用于筛查发现的可疑恶性结节的精准评估, 为治疗策略制定提供可靠依据, 兼顾筛查安全性与诊断准确性^[19-20]。然而本研究存在一定局限性: ①为单中心研究, 103例样本量偏小, 可能影响结果普适性; ②未按年龄亚组分层分析, 不同年龄群体肺部生理状态、结节发病特点存在差异, 缺乏针对性探讨会降低结果对不同人群的适配性。后续需扩大样本量, 增加年龄亚组及结节特征分层研究, 提升结论精准性与临床适配性。

综上所述, 本研究证实低剂量CT与常规剂量CT在肺小结节检出率及图像质量上相当, 但低剂量CT的辐射剂量更低, 更适合作为广泛年龄人群肺小结节的筛查手段; 常规剂量CT在肺小结节良恶性鉴别准确度上更具优势, 适合对筛查发现的疑似结节进行精准诊断。临床中, 应根据受检者具体情况(如筛查目的、年龄、

结节风险等级)个性化选择扫描方式, 兼顾诊断效果与辐射风险控制, 助力肺癌早期防治。

参考文献

- [1] 王彪, 董亚锋, 马雯, 等. 低剂量螺旋CT联合肿瘤标志物在肺癌高危人群筛查中的价值[J]. 河南医学研究, 2025, 34(4): 636-640.
- [2] 冯靖, 尹剑兵, 崔磊. 2024年版日本《低剂量CT肺癌筛查发现的肺结节管理指南》与2023年版《中国肺癌低剂量CT筛查指南》的比较分析[J]. 中华肿瘤杂志, 2025, 47(8): 763-768.
- [3] 谭龙飞, 王汉, 牟安娜. 高分辨胸部CT联合外周血actinin-4、CDH5肺结节定性的价值[J]. 转化医学杂志, 2025, 14(11): 119-124.
- [4] 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.
- [5] 中华医学会呼吸病学分会, 中国肺癌防治联盟专家组. 肺结节诊治中国专家共识(2024年版)[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2024, 47(8): 716-729.
- [6] 沈心楠, 李信友, 彭刚, 等. 基于不同剂量评价方法探讨体型及性别对胸部低剂量CT辐射剂量的影响[J]. 中华放射学杂志, 2025, 59(7): 784-790.
- [7] 姜文龙, 王帅, 吴志斌, 等. 自动管电压选择技术(CARE KV)对急性胸痛三联征CTA图像质量及辐射剂量影响的研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(4): 101-103.
- [8] Tuminello S, Flores R, Untalan M, et al. Predicted effect of incidental pulmonary nodule findings on NSCLC mortality[J]. J Thorac Oncol, 2025, 20(3): 273-284.
- [9] Wei W, Wang SG, Zhang JY, et al. Implementation of individualized low-dose computed tomography-guided hook wire localization of pulmonary nodules: feasibility and safety in the clinical setting[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(20): 3235-3236.
- [10] O'Regan PW, Harold-Barry A, O'Mahony AT, et al. Ultra-low-dose chest computed tomography with model-based iterative reconstruction in the analysis of solid pulmonary nodules: a prospective study[J]. World J Radiol, 2024, 16(11): 668-677.
- [11] Hardie RC, Trout AT, Dillman JR, et al. Performance of lung nodule computer-aided detection systems on standard-dose and low-dose pediatric CT scans: an intraindividual comparison[J]. AJR Am J Roentgenol, 2025, 224(1): e2431972.
- [12] Ding L, Chen M, Li X, et al. Ultra-low dose dual-layer detector spectral CT for pulmonary nodule screening: image quality and diagnostic performance[J]. Insights Imaging, 2025, 16(1): 11-12.
- [13] Li EL, Ma AL, Wang T, et al. Low-dose versus standard-dose computed tomography-guided biopsy for pulmonary nodules: a randomized controlled trial[J]. J Cardiothorac Surg, 2023, 18(1): 86-87.
- [14] Wang J, Sui X, Zhao R, et al. Value of deep learning reconstruction of chest low-dose CT for image quality improvement and lung parenchyma assessment on lung window[J]. Eur Radiol, 2024, 34(2): 1053-1064.
- [15] 李蒙, 张丽, 张泽伟, 等. 胸部低剂量CT肺癌筛查在检出其他常见慢性非传染性疾病的价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(2): 217-220.
- [16] 张晶晶, 张强, 董旭鹏. 低剂量CT扫描结合CD147、TK1水平检验在肺小结节良恶性鉴别中的应用价值[J]. 临床和实验医学杂志, 2023, 22(12): 1327-1330.
- [17] Wang J, Zhu Z, Pan Z, et al. Deep learning reconstruction improves computer-aided pulmonary nodule detection and measurement accuracy for ultra-low-dose chest CT[J]. BMC Med Imaging, 2025, 25(1): 200-201.
- [18] Yao Y, Su X, Deng L, et al. Effects of tube voltage, radiation dose and adaptive statistical iterative reconstruction strength level on the detection and characterization of pulmonary nodules in ultra-low-dose chest CT[J]. Cancer Imaging, 2024, 24(1): 123-124.
- [19] 郭子祺, 田苗, 廉丽敏. 低剂量呼气相胸部CT参数与慢性支气管炎功能的关系分析[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31(7): 43-45.
- [20] 葛晓莉. 宝石能谱CT低剂量扫描肺癌诊断中应用价值探析[J]. 罕少疾病杂志, 2022, 29(9): 28-29.