

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.01.011

# PET/CT 低剂量 CT 扫描参数优化及辐射剂量控制分析

聂贺, 伊莎莎

(河南科技大学第一附属医院 核医学科, 河南洛阳 471000)

**【摘要】目的** 探讨正电子发射断层显像/计算机断层扫描 (positron emission tomography/computed tomography, PET/CT) 检查中低剂量 CT 扫描参数的优化策略, 评估基于体重分级的管电流调整方案对辐射剂量、图像质量及 PET 定量稳定性的影响。**方法** 回顾性纳入 2024 年 6 月至 2025 年 6 月于河南科技大学第一附属医院接受 18F-氟代脱氧葡萄糖 (18F-fluorodeoxyglucose, 18F-FDG) PET/CT 检查的 130 例患者, 根据低剂量 CT 扫描方案不同分为对照组和观察组。对照组采用常规低剂量扫描方案, 观察组采用基于体重分级的管电流优化方案。比较两组 CT 辐射剂量指标, 包括容积 CT 剂量指数 (volume CT dose index, CTDIvol)、剂量长度乘积 (dose-length product, DLP) 和有效剂量 (effective dose, ED); 比较 2 组 CT 图像质量指标, 包括图像噪声和信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR); 同时比较两组 PET 定量指标, 包括肝脏及纵隔血池平均标准化摄取值 (mean standardized uptake value,  $SUV_{mean}$ )。**结果** 观察组 CTDIvol、DLP 及 ED 均低于对照组 (均  $P < 0.05$ ); 观察组图像噪声高于对照组, SNR 低于对照组 (均  $P < 0.05$ ), 但两组融合图像判读可接受性差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。两组肝脏及纵隔血池  $SUV_{mean}$  比较差异均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ), 且  $SUV_{mean}$  相对偏移率均处于可接受范围内。**结论** 基于体重分级的管电流优化方案可在保证 PET 定量稳定性及融合判读质量的前提下, 能够有效降低 PET/CT 检查中 CT 部分的辐射剂量, 具有良好的临床应用价值。

**【关键词】** 正电子发射断层显像/计算机断层扫描; 低剂量计算机断层扫描; 管电流优化; 辐射剂量; 定量稳定性

**【中图分类号】** R817.4

**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2026) 01-0054-05

## Optimization of low-dose CT scanning parameters and analysis of radiation dose control in PET/CT

NIE He, YI Shasha

(Department of Nuclear Medicine, The First Affiliated Hospital of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China)

**【Abstract】Objective** To investigate optimization strategies for low-dose CT acquisition parameters in positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) and to evaluate the impact of a body weight-based tube current adjustment protocol on radiation dose, CT image quality, and the stability of PET quantitative measurements. **Methods** A total of 130 patients who underwent 18F-fluorodeoxyglucose (18F-FDG) PET/CT at the First Affiliated Hospital of Henan University of Science and Technology between June 2024 and June 2025 were retrospectively enrolled. According to the low-dose CT protocol used, patients were assigned to either a control group, scanned with the conventional low-dose protocol, or an observation group, scanned with a body weight-stratified tube current optimization protocol. CT radiation dose metrics, including volume CT dose index (CTDIvol), dose-length product (DLP), and effective dose (ED), were compared between the two groups. CT image quality, including image noise and signal-to-noise ratio (SNR), were compared between the two groups. Simultaneously PET quantitative stability, including the mean standardized uptake value ( $SUV_{mean}$ ) of the liver and mediastinal blood pool, were compared between the two groups. **Results** CTDIvol, DLP, and ED were all significantly lower in the observation group than in the control group (all  $P < 0.05$ ). Image noise was significantly higher and SNR was significantly lower in the observation group (both  $P < 0.05$ ). However, no significant difference was observed between the two groups in the acceptability of fused-image interpretation ( $P > 0.05$ ). The liver  $SUV_{mean}$  and mediastinal blood pool  $SUV_{mean}$  did not differ significantly between groups (both  $P > 0.05$ ), and the relative deviations in  $SUV_{mean}$  remained within an acceptable range. **Conclusion** A body weight-based tube current optimization protocol can effectively reduce the radiation dose from the CT component of PET/CT while maintaining PET quantitative stability and acceptable fused-image interpretability, indicating good potential for clinical application.

**【Key words】** Positron emission tomography/computed tomography; Low-dose computed tomography; Tube current optimization; Radiation dose; Quantitative stability

收稿日期: 2025-08-12。

作者简介: 聂贺, 主管技师, 研究方向: 核医学。E-mail: 15896679325@163.com。

正电子发射断层显像/计算机断层扫描 (positron emission tomography/computed tomography, PET/CT) 作为融合功能代谢与解剖结构信息的重要临床影像技术, 已广泛用于肿瘤诊断、分期及疗效评估中<sup>[1]</sup>。随着该技术在临床中的普及, 其检查过程中 CT 部分产生的额外辐射剂量逐渐成为临床关注的重点, 尤其在需多次复查的患者群体中, 剂量累积问题不容忽视<sup>[2]</sup>。PET/CT 中的低剂量 CT 主要用于衰减校正与解剖定位, 虽不以诊断为主要目的, 但 CT 数据直接参与 PET 衰减校正过程, 其图像噪声及密度估计误差可能影响平均标准化摄取值 (mean standardized uptake value,  $SUV_{mean}$ ) 等定量参数的稳定性, 因此, 低剂量优化必须实现辐射控制与定量稳定性之间的平衡。

既往研究尝试通过自动管电流调制降低 CT 剂量, 但多采用固定参考参数, 未充分考虑不同体型患者的 X 射线衰减差异, 不仅可能导致小体型患者剂量冗余, 还会使体型偏胖患者图像噪声升高, 进而影响融合图像判读质量<sup>[3]</sup>。部分基于体型或体重的分级策略虽被提出, 但临界值划分不统一, 剂量降低幅度有限, 部分方案或在低管电流条件下图像质量受损, 提示现有个性化优化方案仍缺乏稳定、可推广的技术路径。体重作为临床最易获取且与体型衰减特征密切相关的指标, 可作为低剂量 CT 个体化调控的可操作替代指标; 将其与迭代重建等降噪技术相结合, 在维持衰减校正稳定性与图像可接受性的前提下, 有望进一步减少患者的辐射暴露<sup>[4]</sup>。

基于上述背景, 本研究构建基于体重分级的管电流优化策略, 系统评估其在辐射剂量、CT 图像质量及 PET 定量稳定性方面的综合表现, 以期 PET/CT 低剂量扫描参数标准化提供临床依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

本研究为单中心回顾性研究, 连续纳入 2024 年 6 月至 2025 年 6 月在我院接受  $^{18}\text{F}$ -氟代脱氧葡萄糖 ( $^{18}\text{F}$ -fluorodeoxyglucose,  $^{18}\text{F}$ -FDG) PET/CT 检查的患者 130 例, 入选患者均完成标准 PET/CT 检查流程, 且其相关影像及剂量学资料完整。根据低剂量 CT 扫描方案的不同, 将患者分为对照组与观察组。本

研究已通过本院伦理委员会审批, 因采用回顾性设计且不涉及患者干预, 免除患者的知情同意权。

纳入标准: ①年龄  $\geq 18$  岁; ②完成一次全身  $^{18}\text{F}$ -FDG PET/CT 检查; ③CT 扫描用于 PET 衰减校正及图像融合; ④图像质量满足临床判读要求。排除标准: ①存在明显体动或呼吸伪影; ②体内存在金属植入物导致严重伪影; ③扫描参数或剂量数据不完整; ④检查过程中流程中断或参数异常。

### 1.2 PET-CT 设备与扫描流程

所有检查均在同一台一体化 PET/CT 系统 (Gemini TF16, PHILIPS, 荷兰) 上完成。受检者检查前禁食时间不少于 6 h, 对其测量空腹血糖 (fasting plasma glucose, FPG) 并将血糖控制在临床可接受范围。静息状态下按体质量注射  $^{18}\text{F}$ -FDG (约 3.7 MBq/kg), 注射后安静休息约 60 min。扫描范围统一为颅底至大腿中段, 检查流程为先行低剂量 CT 扫描, 用于 PET 衰减校正及解剖融合, 随后行 PET 发射扫描。PET 采用三维采集模式, 床位采集时间为 1.5~2.0 min/bed, 图像采用有序子集最大似然期望值法 (ordered subsets expectation maximization, OSEM) 结合飞行时间质谱 (time of flight, TOF) 及点扩散函数 (point spread function, PSF) 的标准算法进行重建。

### 1.3 低剂量 CT 扫描方案

对照组采用常规 PET-CT 低剂量 CT 衰减校正扫描方案。CT 采用非增强螺旋扫描, 管电压为 120 kVp, 管电流启用自动管电流调制 (automatic tube current modulation, ATCM) 技术 (DoseRight), 参考管电流设为 50 mAs, 螺距 (Pitch) 为 0.813, 旋转时间为 0.5 s/r, 探测器准直为 16 mm  $\times$  0.75 mm。图像采用迭代重建算法 (iDose<sup>4</sup>, 级别设为 3) 进行重建, 重建层厚及层间距均为 3.0 mm。矩阵大小 512  $\times$  512。

观察组扫描流程、扫描范围及其他采集参数与对照组保持一致, 仅对管电流参数实施体重分级优化, 体重分级临界值的设定参考既往低剂量 CT 个体化研究, 并结合本中心成人受检者体重分布特征确定<sup>[5]</sup>。根据患者体重设置不同的参考 mAs: 体重  $< 60$  kg 者为 20 mAs, 体重 60~80 kg 者为 30 mAs, 体重  $> 80$  kg 者为 40 mAs。螺距、旋转时间及探测器准

直与对照组一致,且图像重建采用更高等级的迭代重建算法 (iDose<sup>4</sup>, 强度 3~4), 重建层厚及间距均为 3.0 mm。

### 1.4 观察指标

(1) 辐射剂量指标: 通过扫描后由系统自动生成的放射剂量报告获取各组受检者的辐射剂量参数。容积剂量指数 (volume computed tomography dose index, CTDI<sub>vol</sub>): 反映扫描层厚内平均辐射剂量水平 (单位: mGy)。该指标用于评估不同管电流优化方案下 CT 扫描的辐射输出强度差异。记录每例受检者 CT 扫描的剂量长度积 (dose-length product, DLP), 并据此计算有效剂量 (effective dose, ED)。计算公式为:  $ED = DLP \times k$ 。换算系数  $k$  采用国际放射防护委员会 (international commission on radiological protection, ICRP) 推荐的成人躯干 CT 换算系数 0.015 mSv / (mGy · cm) [6]。

(2) CT 图像质量指标: 客观评价时, 统一在右侧腰大肌中段及肝右叶实质区放置感兴趣区 (region of interest, ROI), 避开血管、病灶及伪影区域。每个 ROI 面积约 100 mm<sup>2</sup>, 重复测量 3 次取平均值。图像噪声定义为 ROI 内 CT 值标准差, 信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 按平均 CT 值与噪声的比值计算。主观图像质量由 2 名具有 10 年以上 PET/CT 诊断经验的放射科医师在双盲条件下独立完成评价。采用 5 分制 Likert 评分法评价图像噪声、解剖结构显示清晰度及融合图像可接受性, 其中 1 分为不可诊断, 5 分为图像质量优秀。若两位医师评分差异 ≥ 2 分, 则由第三名医师参与讨论后达成一致意见。采用 Kappa 检验评估两位医师的评分一致性。

(3) PET 定量稳定性指标: 在 PET 图像上选取肝脏及纵隔血池等代谢相对稳定的参考区域, 测量其  $SUV_{mean}$ , 比较两组  $SUV_{mean}$  的差异, 并计算  $SUV_{mean}$  的相对偏移率 ( $\Delta SUV_{mean} \%$ ), 该指标用于评估不同 CT 扫描方案对 PET 定量结果的系统性影响。

### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 26.0 统计软件进行分析。计量资料符合正态分布的以均数 ± 标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示, 比较采用单因素方差分析; 非正态分布的资料采用

Kruskal-Wallis 检验。计数资料以例 (%) 表示, 组间比较采用  $\chi^2$  检验或 Fisher 确切概率法。两位医师的评分一致性采用 Kappa 检验。 $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 一般资料比较

两组患者在年龄、性别构成及体重等一般资料方面差异均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ), 组间具有可比性 (表 1)。

表 1 2 组患者一般资料比较 (例,  $\bar{x} \pm s$ )

组别	年龄 (岁)	性别 (男/女)	体重 (kg)
对照组 (n=65)	58.42 ± 10.36	37/28	67.85 ± 9.12
观察组 (n=65)	57.89 ± 9.94	35/30	68.31 ± 8.76
$t/\chi^2$	0.294	0.123	-0.297
$P$	0.769	0.726	0.767

### 2.2 辐射剂量比较

观察组 CTDI<sub>vol</sub>、DLP 及 ED 均显著低于对照组 (均  $P < 0.05$ ) (表 2、图 1)。

表 2 2 组低剂量 CT 扫描辐射剂量指标比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

组别	CTDI <sub>vol</sub> (mGy)	DLP (mGy · cm)	ED (mSv)
对照组 (n=65)	3.48 ± 0.62	248.73 ± 45.68	3.73 ± 0.69
观察组 (n=65)	2.31 ± 0.54	164.52 ± 38.41	2.47 ± 0.58
$t$	11.324	11.176	11.013
$P$	0.001	0.001	0.001

注: CT 为计算机断层扫描; CTDI<sub>vol</sub> 为容积剂量指数; DLP 为剂量长度积; ED 为有效剂量。

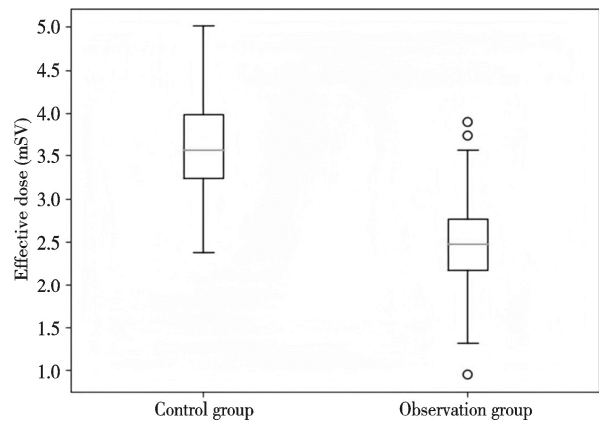


图 1 2 组低剂量 CT 扫描方案下 ED 分布比较箱线图

注: CT 为计算机断层扫描; ED 为有效剂量。

### 2.3 CT 图像质量评价结果

观察组的图像噪声高于对照组, 而 SNR 低于对照组 (均  $P < 0.05$ )。两组在解剖结构显示清晰度及 PET-CT 融合判读可接受性方面差异均无统计学意义。

义 (均  $P > 0.05$ ) (表 3、图 2)。

表 3 2 组 CT 图像质量评价结果比较 [例 (%),  $\bar{x} \pm s$ ]

组别	图像噪声 (HU)	SNR	融合判读可接受性
对照组 ( $n=65$ )	$18.42 \pm 3.16$	$6.12 \pm 1.08$	65 (100.0)
观察组 ( $n=65$ )	$22.37 \pm 3.84$	$5.01 \pm 0.96$	63 (96.9)
$t/\chi^2$	-6.274	6.014	2.032
$P$	0.001	0.001	0.154

注: CT 为计算机断层扫描; SNR 为信噪比; 观察组 2 例图像质量判定为不可接受, 均为体重  $> 80$  kg 患者, 表现为图像噪声略高, 但不影响 PET 衰减校正及解剖定位判读。两位医师主观评分一致性良好, Kappa 值为 0.81。

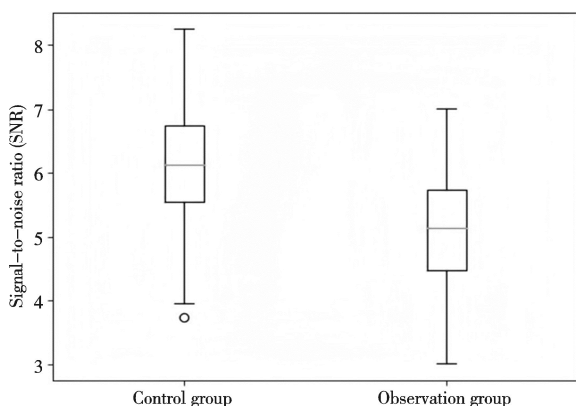


图 2 2 组 CT 图像 SNR 分布箱线图

注: CT 为计算机断层扫描; SNR 为信噪比。

## 2.4 PET 定量稳定性分析

2 组患者肝脏及纵隔血池的  $SUV_{mean}$  及  $\Delta SUV_{mean}\%$  比较差异均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ) (表 4)。

表 4 2 组 PET 定量指标比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

组别	肝脏 $SUV_{mean}$	纵隔血池 $SUV_{mean}$	$\Delta SUV_{mean}\%$ (肝脏)	$\Delta SUV_{mean}\%$ (血池)
对照组 ( $n=65$ )	$2.41 \pm 0.32$	$1.52 \pm 0.21$	—	—
观察组 ( $n=65$ )	$2.38 \pm 0.30$	$1.49 \pm 0.20$	-1.24	-1.97
$t$	0.554	0.812	—	—
$P$	0.581	0.418	—	—

注: PET 为正电子发射断层显像;  $SUV_{mean}$  为平均标准化摄取值;  $\Delta SUV_{mean}\%$  为  $SUV_{mean}$  均值相对偏移率 (观察组相较于对照组)。

## 3 讨论

PET/CT 在肿瘤诊断、分期及疗效评估中具有重要作用, 但检查过程中同时存在放射性示踪剂与 CT 扫描带来的双重辐射暴露, 因此剂量控制始终是临床关注的重点<sup>[7-8]</sup>。在 PET/CT 检查中, 低剂量 CT 不仅用于解剖定位, 还直接参与 PET 衰减校正, 其参数设置既不能简单沿用常规诊断 CT 标准, 也不能单纯以降低剂量为目标。如何在减少辐射暴露的同时兼顾图像可读性和 PET 定量稳定性, 是 PET/CT 技

术优化中的关键问题<sup>[9-10]</sup>。

本研究结果显示, 与常规低剂量 CT 扫描方案相比, 基于体重分级的管电流优化策略可明显降低 CTDIvol、DLP 及 ED, 说明该方案在辐射防护方面具有一定实际价值。固定管电流设置操作简单, 但未充分考虑不同体型受检者的个体差异。体型较小者若采用统一参数, 往往存在不必要的辐射输出; 体型较大者若剂量压低过多, 则可能导致图像噪声增加, 影响融合判读。按照体重分级调整管电流, 本质上是使扫描参数更贴合受检者实际衰减条件, 从而提高剂量分配的合理性。结果提示, PET/CT 低剂量 CT 参数优化不宜停留在统一固定值层面, 而应向个体化、分层化方向发展<sup>[11]</sup>。在图像质量方面, 观察组噪声升高、SNR 下降, 但两组在融合图像判读可接受性方面差异无统计学意义, 且观察组图像均满足 PET 衰减校正及解剖定位的临床需求。表明 PET/CT 中低剂量 CT 的质量要求与诊断性 CT 并不相同。对 PET/CT 而言, 低剂量 CT 的核心价值在于提供稳定的衰减校正和基本解剖参照, 而非单独完成精细诊断。因此, 部分客观图像质量指标的下降, 并不一定导致临床价值下降。即在 PET/CT 这一特定场景下, 图像质量评价更应强调“是否足够使用”, 而非一味追求更高的客观参数。本研究中, 观察组在降低管电流后仍维持了较好的融合判读质量, 这与迭代重建技术的补偿作用有关。较高等级的 iDose4 迭代重建可在低剂量条件下抑制量子噪声, 改善图像颗粒感, 并在一定程度上保持组织边界和结构辨识度, 从而减轻低管电流对图像质量的不利影响。由此可见, 本研究取得的剂量获益并非单纯依赖曝光降低, 而是在采集参数优化基础上结合重建算法补偿共同实现。这种“降剂量+重建优化”的思路, 更符合当前低剂量影像技术的发展趋势。PET 定量稳定性是评价该策略能否推广应用的另一关键环节。低剂量 CT 若影响衰减校正, 可能进一步干扰  $SUV_{mean}$  测量, 削弱 PET 结果的可比性。本研究显示, 两组肝脏及纵隔血池  $SUV_{mean}$  差异均无统计学意义, 且相对偏移率均处于可接受范围内, 提示基于体重分级的管电流优化未对 PET 定量结果造成明显系统性偏移。肝脏及纵隔血池通常被视为较稳定的参考

区域,其  $SUV_{mean}$  变化对技术参数较为敏感。本研究在上述区域未观察到明显差异,说明优化后的低剂量 CT 方案能够维持衰减校正的可靠性,这对于 PET/CT 在疗效评估、随访比较及定量分析中的应用尤为重要。本研究纳入了多种常见实体瘤及不同检查目的的患者,较能反映真实临床 PET/CT 检查场景。尽管不同肿瘤类型、不同检查阶段对图像质量及定量重复性的要求并不完全一致,但本研究中观察组仍保持了较好的融合判读质量和 PET 定量一致性,提示该策略具有一定的临床通用性。

本研究局限性在于:作为单中心回顾性研究,样本量相对有限,且对极端体型患者及复杂病灶条件下的图像表现缺乏更深入分析。结论的外推性尚需多中心、大样本研究来进一步证实。

综上,基于体重分级的管电流优化策略可在保证 PET 定量稳定性和融合判读质量的前提下,有效降低 PET/CT 检查中 CT 部分的辐射剂量,具有较好的临床可行性和应用前景,可为 PET/CT 低剂量扫描参数的进一步优化与规范化提供参考。

#### 参考文献

- [1] 辛海荣, 闫斯勇. PET-CT 设备工作原理及临床应用现状[J]. 临床医学工程, 2025, 32 (11): 1309-1312.
- [2] XIE Y, TANG W, ZHANG L, *et al.* A hybrid curve-fitting method for radiation dosimetry evaluation and simultaneous multi-organ biodistribution assessment in total-body dynamic PET/CT: application to a novel PD-L1-targeted tracer[J]. EJNMMI Phys, 2025, 13(1):15.
- [3] 李宁, 何正中, 杨志, 等. 18F-FDG 和 18F-FETPET-CT 检查致受检者辐射剂量研究[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29 (1): 76-80, 84.
- [4] 袁超, 何朝梁, 杨洁, 等. 基于自动管电流调制技术不同定位像组合方式在头颈部 CT 血管成像检查中辐射剂量和图像质量的应用研究[J]. 实用医学影像杂志, 2025, 26 (2): 138-143.
- [5] PRABSATTROO T, PHAOROD J, TATHUWAN P, *et al.* Evaluation of Radiation Dose and Image Quality in Clinical Routine Protocols from Three Different CT Scanners[J]. J Imaging, 2025, 11(3):70.
- [6] ALSULIMANE M E. Evaluation of computed tomography radiation dose metrics in Saudi Arabia: Comparison to national and international diagnostic reference levels[J]. Saudi Med J, 2025, 46(12):1409-1418.
- [7] 李应堃, 侯正松. 恶性肿瘤患者 PET-CT 检查对环境及相关工作人员的辐射剂量分析[J]. 海军军医大学学报, 2022, 43 (2): 229-232.
- [8] WALL J S, MARTIN E B, ENDSLEY A, *et al.* First in Human Evaluation and Dosimetry Calculations for Peptide 124I-p5+14-a Novel Radiotracer for the Detection of Systemic Amyloidosis Using PET/CT Imaging[J]. Mol Imaging Biol, 2022, 24(3):479-488.
- [9] 陈琳琳, 尚国栋, 刘丽娟, 等. CT 扫描参数优化对降低辐射剂量的影响[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9 (10): 65-67.
- [10] 蔡维维, 程瑾, 陈楚韩, 等. 低管电压联合深度学习图像重建算法在降低胸腹部联合增强 CT 辐射剂量的价值[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34 (3): 359-368.
- [11] 张剑, 何平, 李原, 等. 能谱 CT 在腹部增强扫描改善图像质量与降低辐射剂量的可行性研究[J]. 宁夏医学杂志, 2022, 44 (8): 689-691, 672.